Partie F : MODULE TASPIE+

F.1. INTRODUCTION....7

F.2. ASPECTS THEORIQUES....8

F.2.1. Notations....8

F.2.2. Principe du modèle....8

F.2.3. Formulation....10
F.2.3.1 Hypothèses générales....10
F.2.3.2 Equations régissant l'équilibre du modèle....10

F.2.4. Fonctions de transfert....11
F.2.4.1 Selon Frank et Zhao (1982)....12
F.2.4.2 Selon Monnet (2000)....12
F.2.4.3 Cas du frottement négatif....13

F.2.5. Résolution....13
F.2.5.1 Méthode générale de résolution....13
F.2.5.2 Modèle du pieu isolé (modèle 1a)....14
F.2.5.3 Modèle du pieu en maille (modèle 1b) – calcul à contraintes imposées (de type remblai)....14
F.2.5.4 Modèle du pieu en maille (modèle 1b) – calcul à déformations imposées (de type dallage)....14

F.2.6. Domaine de validité....15
F.2.6.1 Validité du choix des valeurs de frottement limite....15
F.2.6.2 Validité du choix des valeurs du module de déformation E_s....16
F.2.6.3 Vérification de cohérence de l'état de contraintes dans le matelas....16

F.2.7. Extension du modèle 1b sous la pointe du pieu....17

F.2.8. Calculs de capacité portante....17

F.2.9. Estimation des raideurs en tête....18

F.3. MANUEL D'UTILISATION....19

F.3.1. Gestion des pieux....19

F.3.2. Onglet "Paramètres"....20
F.3.2.1 Cadre "Paramètres généraux"....20
F.3.2.2 Cadre "Mode de calcul"....20
F.3.2.3 Cadre "Cadre de travail"....20

F.3.3. Onglet "Couches"....21
F.3.3.1 Calcul d'un pieu isolé (sans ou avec tassement imposé du sol)....21
F.3.3.2 Calcul d'un pieu + maille de sol associée....22

F.3.4. Onglet "Pieu" 23
F.3.4.1 Cadre "Type de pieu" 23
F.3.4.2 Cadres "Paramètres de pieu" et "Définition du pieu dans chaque couche" 23
F.3.5. Onglet "Sol/pieu" 25
F.3.5.1 Cadre "Loi de mobilisation du frottement latéral du sol et de l'effort de pointe" 25
F.3.5.2 Loi de mobilisation du frottement latéral 27
F.3.5.3 Loi de mobilisation de la contrainte en pointe 30
F.3.6. Onglet "Tassement imposé" 31
F.3.6.1 Cadre "Profil de tassement imposé du sol" 31
F.3.6.2 Assistant d'importation du tassement imposé du sol 32
F.3.7. Onglet "Chargement" 35
F.3.7.1 Pour un calcul de type "Pieu isolé" 35
F.3.7.2 Cas d'un calcul de "Pieu + maille de sol associée" 36
F.3.8. Calcul standard / Calcul pas-à-pas 39
F.3.8.1 Onglet "Paramètres" - Type d'impression 40
F.3.8.2 Onglet "Couches" - Limitations 40
F.3.8.3 Onglet "Sol/pieu" - Limitations 40
F.3.8.4 Onglet "Chargement" 40
F.3.9. Calcul et Résultats 44
F.3.9.1 Calcul 44
F.3.9.2 Résultats numériques 45
F.3.9.3 Résultats graphiques 50

F.4. EXEMPLES DE CALCUL TASPIE+ 54

F.4.1. Exemple 1 : Pieu isolé 54
F.4.1.1 Etape 1 : Pieu isolé 54
F.4.1.2 Saisie des données 54
F.4.1.3 Calcul et Résultats 60
F.4.1.4 Etape 2 : Pieu isolé avec tassements imposés du sol 65
F.4.1.5 Modification des données 65
F.4.1.6 Calcul et résultats 66
F.4.2. Exemple 2 : Groupe de pieux et frottement négatif 68
F.4.2.1 Saisie des données 68
F.4.2.2 Calcul et Résultats 74
F.4.2.3 Comparaison à un pieu isolé 75
F.4.2.4 Calcul et Résultats 76
F.4.2.5 Influence du frottement négatif 77
F.4.2.6 Saisie des données 78
F.4.2.7 Résultats 79
F.4.3. Exemple 3 : Dallage sur sol renforcé par inclusions rigides 81
F.4.3.1 Présentation du projet 81
F.4.3.2 Saisie des données 82
F.4.3.3 Calcul et Résultats 87
F.4.3.4 Ajustement du frottement limite dans le matelas 89
F.4.3.5 Ajustement du frottement limite dans les couches de limons 1 et 2 90
F.4.3.6 Calcul et Résultats 90
F.4.3.7 Vérifications complémentaires - Portance des inclusions 92
F.4.3.8 Vérifications complémentaires - Poinçonnement du matelas 93
F.4.3.9 Vérifications complémentaires - Evaluation des "sollicitations additionnelles" dans le dallage 96

F.4.4. Exemple 4 : Remblai sur sol renforcé par inclusions rigides 101
F.4.4.1 Saisie des données 102
F.4.4.2 Calcul et Résultats 107
F.4.4.3 Vérifications complémentaires 109
F.4.4.4 Poinçonnement du remblai 110

*Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011***

TABLE DES FIGURES

Figure F.1 Modèle du pieu seul et modèle du pieu et cylindre de sol associé 9
Figure F.2 Interaction entre les deux domaines du modèle 1b (pieu et du cylindre de sol associé) 10
Figure F.3 Lois de mobilisation du frottement et de l'effort de pointe (Frank et Zhao, 1982) 12
Figure F.4 Lois de mobilisation du frottement (Monnet, 2000) 12
Figure F.5 Extension des lois de mobilisation du frottement pour les déplacements relatifs négatifs 13
Figure F.6 Extension du modèle sous la pointe du pieu 17
Figure F.7 Gestion des pieux dans le module Taspie+ 19
Figure F.8 Onglet "Paramètres" 20
Figure F.9 Onglet "Couche" pour un calcul d'un pieu isolé avec ou sans tassement imposé du sol 21
Figure F.10 Onglet "Couche" pour un calcul d'un pieu + maille de sol associée 22
Figure F.11 Récapitulatif des paramètres nécessaires dans le cadre "Type de pieu" 23
Figure F.12 Onglet "Pieu" pour un calcul de pieu isolé de section circulaire, de module variable le long du pieu 24
Figure F.13 Onglet "Pieu" pour un calcul de type "pieu + maille associée", avec un pieu de section quelconque et de caractéristiques constantes le long du pieu 24
Figure F.14 Onglet "Sol/pieu" 26
Figure F.15 Onglet "Sol/pieu" : affichage de la courbe qp = f(yp) 26
Figure F.16 Onglet "Sol/pieu" : affichage des 2 courbes qs=f(y) et qp = f(yp) 27
Figure F.17 Loi de mobilisation du frottement de Frank et Zhao 27
Figure F.18 Cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral" – Loi de Frank & Zhao 27
Figure F.19 Loi de mobilisation du frottement de Monnet 28
Figure F.20 Cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral" – Loi de Monnet 28
Figure F.21 Cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral" – Entrée point par point 29
Figure F.22 Cadre "Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe" – Lois Frank&Zhao ou Monnet 30
Figure F.23 Cadre "Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe" – Entrée point par point 31
Figure F.24 Exemple de tassement du sol imposé par l'utilisateur 32
Figure F.25 Assistant d'importation du tassement du sol imposé depuis Taspie+ 33
Figure F.26 Assistant d'importation du tassement du sol imposé depuis Tasseldo 33
Figure F.27 Assistant d'importation du tassement du sol imposé depuis Tasneg 34
Figure F.28 Onglet "Chargement" pour un calcul de Pieu isolé 35
Figure F.29 Assistant des paramètres avancés pour un calcul "Pieu isolé" 36
Figure F.30 Onglet "Chargement" d'un calcul de type pieu + maille de sol associée de type Dallage 37
Figure F.31 Figure d'aide – Choix du type de calcul Dallage/Remblai 37
Figure F.32 Onglet "Chargement" d'un calcul Pieu + maille de sol associée de type Remblai 38
Figure F.33 Figure d'aide – Signification du paramètre $e_Q$pieu 38
Figure F.34 Assistant Paramètres avancés pour un calcul "pieu + maille de sol associée" 39
Figure F.35 Onglet "Paramètres" – Cas d'un calcul "pas-à-pas" 40
Figure F.36 Assistant des paramètres avancés – Calcul pas-à-pas (pieu isolé) 41
Figure F.37 Assistant des paramètres avancés – Calcul pas-à-pas (pieu+maille associée - type dallage) 42
Figure F.38 Assistant des paramètres avancés – Calcul pas-à-pas (pieu+maille associée - type remblai) 43
Figure F.39 Fenêtre Résultats 45
Figure F.40 Résultats numériques formatés (rappel des données) 45

Figure F.41 Résultats numériques formatés – Capacité portante 46
Figure F.42 Résultats numériques formatés détaillés et raideurs équivalentes pour un calcul de pieu isolé....47
Figure F.43 Résultats numériques formatés – Pieu+maille associée, type dallage (informations relatives à la maille) 48
Figure F.44 Résultats numériques formatés (solution) pour un calcul d'un pieu + maille de type Dallage 49
Figure F.45 Résultats numériques formatés – Pieu+maille associée, type remblai (informations relatives à la maille) 49
Figure F.46 Résultats numériques – Tableau de résultats 50
Figure F.47 Résultats graphiques – Courbes de chargement (calcul de pieu isolé) 50
Figure F.48 Résultats graphiques – Résultats principaux (pieu isolé)....51
Figure F.49 Résultats graphiques – Résultats principaux (pieu + maille associée) 51
Figure F.50 Résultats graphiques – Résultats complémentaires 52

TABLE DES TABLEAUX

Tableau F.1 Récapitulatif des paramètres généraux....20
Tableau F.2 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du sol - Calcul de type "Pieu isolé"....21
Tableau F.3 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du sol - Calcul de type "Pieu + maille associée" 22
Tableau F.4 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du pieu 25
Tableau F.5 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du frottement (loi de Frank & Zhao) 28
Tableau F.6 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du frottement (loi de Monnet)....29
Tableau F.7 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du frottement – Entrée point par point 30
Tableau F.8 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe (lois de Frank&Zhao ou Monnet) 30
Tableau F.9 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe (entrée point par point)....31
Tableau F.10 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du tassement imposé du sol 32
Tableau F.11 Paramètres avancés, cas d'un pieu isolé 36
Tableau F.12 Paramètres de la maille (cas d'un calcul "pieu+maille associée")....36
Tableau F.13 Récapitulatif des paramètres avancés pour un calcul "pieu + maille de sol associée"....38
Tableau F.14 Paramètres de l'Assistant des paramètres avancés– Calcul pas-à-pas (pieu isolé) 41
Tableau F.15 Paramètres de l'Assistant des paramètres avancés– Calcul pas-à-pas (pieu + maille associée, type dallage)....42
Tableau F.16 Paramètres de l'Assistant des paramètres avancés– Calcul pas-à-pas (pieu + maille associée, type remblai) 44

F.1. Introduction

Le module Taspie+ permet de simuler le comportement de tout type de fondation profonde isolée, sous chargement axial, en intégrant ou non le volume de sol qui lui est associé, lorsque cet élément appartient à un groupe ou un réseau. Cet élément de fondation profonde est dénommé pieu par simplification.

Le calcul est basé sur la notion des fonctions de transfert (lois établissant la relation entre le frottement latéral et le déplacement du pieu d'une part, la contrainte en pointe et le déplacement d'autre part). La notion de fonction de transfert a été présentée à l'origine par Coyle et Reese (ASCE, 1966). Elle se trouve généralisée dans Taspie+ en considérant à la fois :

- ✓ le déplacement relatif pieu-sol en lieu et place du déplacement absolu du pieu tant pour le frottement que pour la réaction en pointe, ce qui élargit singulièrement son champ d'application.
- ✓ son extension aux prismes de sol de même section, placés au dessus de la tête du pieu ou sous la base de celui-ci.

F.2. Aspects théoriques

F.2.1. Notations

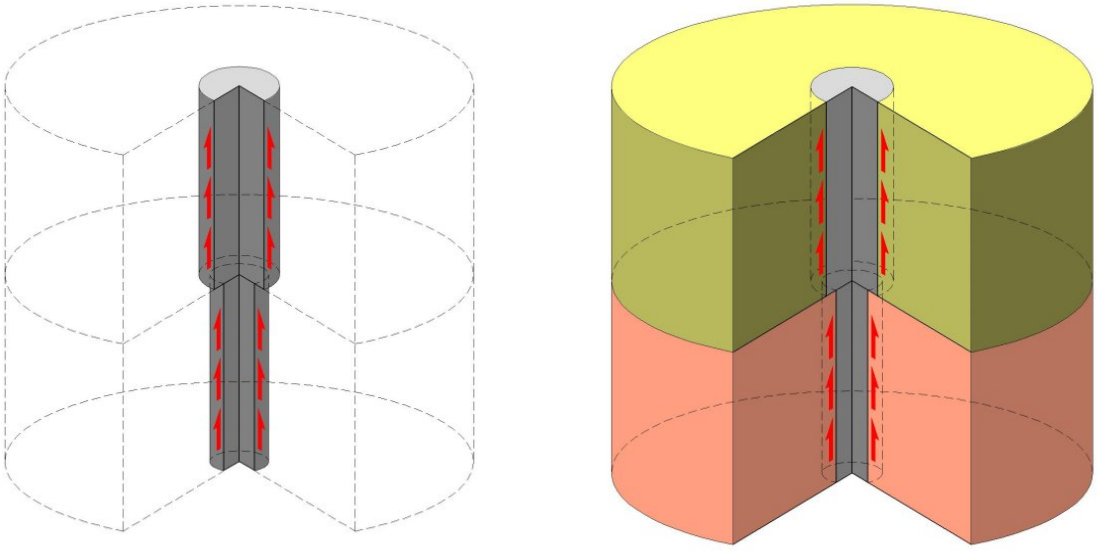
Dans toute la suite, les notations suivantes sont adoptées :

C_R Coefficient de relaxation utilisé dans un calcul de type remblai
D_s Diamètre équivalent de la fondation du point de vue du périmètre
D_p Diamètre équivalent du pieu du point de vue de la section
E_M Module pressiométrique de la couche
E_p Module d'Young du pieu
E_{QP} Fraction de la charge totale appliquée en tête du modèle qui est supportée directement par la tête du pieu
E_s Module de déformation représentatif du sol
H, H_i Hauteur d'une couche du modèle (caractéristiques du sol et du pieu constantes)
P Périmètre du pieu
q_s Frottement latéral limite pieu-sol (noté q_{sl} dans l'interface utilisateurs de Taspie+)
q_p Contrainte limite sous la pointe du pieu
$Q_p(z)$ Effort normal dans le pieu à la profondeur z
$Q_s(z)$ Résultante verticale des charges transmises au sol à la profondeur z
S Section du domaine de calcul ($S = S_p(z) + S_s(z)$) pour toute valeur z
$S_p(z)$ Section du pieu à la profondeur z
$S_s(z)$ Section complémentaire de sol à la profondeur S
$y_p(z)$ Tassement du pieu à la profondeur (z)
$y_s(z)$ Tassement moyen du sol à la profondeur z
w(z) Déplacement relatif : $w(z) = y_p(z) – y_s(z)$
τ Cisaillement contre le pieu
γ_p Poids volumique du pieu
γ_s Poids volumique du sol
ΣH Hauteur totale du domaine de calcul

F.2.2. Principe du modèle

Deux modèles de calcul peuvent être adoptés (Figure F.1) :

- Modèle limité à l'élément de fondation profonde (1a) : l'interaction avec le sol encaissant est supposée entièrement décrite par les lois de transfert choisies. Il est possible cependant de prendre en compte un tassement du sol autour du pieu sous la forme d'un profil imposé de tassement qui demeure indépendant du résultat des calculs. L'axe du pieu peut être d'orientation quelconque ;
- Modèle englobant l'élément de fondation profonde et la maille élémentaire de sol associée (1b). L'interaction entre ces deux domaines est prise en compte, ce qui signifie à la fois que le comportement du pieu est affecté par le tassement du sol encaissant et que le tassement du sol dépend également de la distribution des efforts dans le pieu. L'axe du pieu est nécessairement vertical.



1a : Modèle pieu seul 1b : Modèle pieu et cylindre de sol associé

Figure F.1 Modèle du pieu seul et modèle du pieu et cylindre de sol associé

Le modèle 1a peut être utilisé pour établir :

- la courbe de chargement d'un pieu isolé dans un massif dont les tassements sont négligés ;
- la courbe de chargement d'un pieu isolé lorsque le profil de tassement du sol dans l'axe du pieu est supposé connu et indépendant du chargement appliqué au pieu. Ce cas peut être celui :
  - d'un pieu réalisé depuis le fond d'une excavation qui traverse des couches soumises à extension ;
  - d'un pieu traversant des couches subissant un phénomène de gonflement ;
  - d'un pieu installé dans un massif de sol qui tasse sous l'action de facteurs externes (charges en surface ou rabattement).

Le modèle 1b est utilisé pour étudier le comportement d'un motif périodique au sein d'un groupe de pieux tous identiques. Ceci s'applique notamment :

- à l'étude d'une maille élémentaire du renforcement d'un sol par inclusions rigides verticales :
  - sous un radier ou un dallage, en association avec une couche intermédiaire servant de matelas de répartition ; les conditions de chargement en tête peuvent souvent être assimilées en première approximation à une condition de déplacement imposé (les déformations internes du radier ou du dallage étant négligeables devant les tassements absolus, le tassement en sous face du dallage peut être considéré uniforme sur la largeur de la maille) ;
  - sous un remblai. Ce cas est celui des remblais sur pieux ("piled embankment"). Les conditions de chargement en tête sont généralement celles d'une contrainte imposée uniforme en tête de la maille.
- à l'étude du motif élémentaire d'une fondation mixte associant un radier et des pieux directement connectés à celui-ci.
  - le modèle Taspie+ s'applique de manière privilégiée aux pieux placés en partie centrale de l'ouvrage si l'entraxe dans les deux directions demeure proche d'une valeur moyenne ;
  - il peut également s'appliquer aux pieux périphériques moyennant certaines hypothèses simplificatrices.

F.2.3. Formulation

La formulation des équations du problème est explicitée dans le cas le plus général du modèle 1b : pieu et volume de sol associé.

F.2.3.1 Hypothèses générales

- Seuls les efforts axiaux dans le pieu sont considérés ;
- La géométrie du problème est supposée à symétrie radiale : le pieu et le volume élémentaire de sol associé sont assimilés à des cylindres de géométrie équivalente ;
- Le chargement est également supposé à symétrie radiale ;
- Les charges appliquées au modèle sont représentées par la charge totale appliquée en tête et le poids des couches rapportées (non présentes dans l'état initial) ;
- Le modèle est supposé périodique ce qui implique que le cisaillement est nul sur les faces verticales extérieures ;
- La maille étudiée est définie par ses dimensions selon deux directions orthogonales ;
- La géométrie du pieu (et des volumes supérieur ou inférieur de sol éventuellement associés) est définie par couches horizontales (diamètre dans le cas d'une section circulaire ou section et périmètre pour une section quelconque).

F.2.3.2 Equations régissant l'équilibre du modèle

Les équations d'équilibre expriment la conservation des efforts dans toute section horizontale du modèle (l'origine des profondeurs est fixée au sommet du modèle).

Nota :

- La notation est allégée pour toutes les données d'entrée qui sont définies par couche (suppression de l'indice d'identification de chaque couche) ;
- "Pieu" désigne de manière indifférenciée l'élément de fondation profonde et les volumes de sol supérieur ou inférieur qui le prolongent éventuellement.

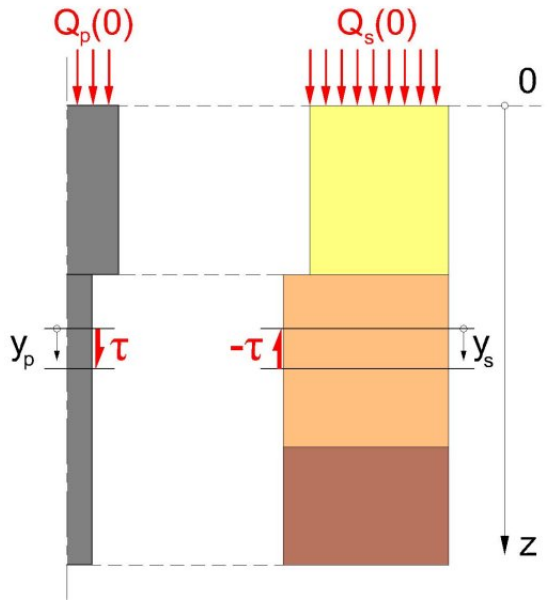


Figure F.2 Interaction entre les deux domaines du modèle 1b (pieu et du cylindre de sol associé)

Dans le pieu :

$$dQ_p(z) = (\tau\, p + \gamma_p\, s_p)\, dz \qquad \textbf{(1)}$$

Dans le sol :

$$dQ_s(z) = \left(-\tau\, p + \gamma_s\, s_s\right) dz \qquad \textbf{(2)}$$

τ représente le cisaillement développé à l'interface pieu-sol par l'interaction des deux domaines.
γ_s désigne le poids volumique des couches qui n'existaient pas dans l'état initial et participent au chargement du modèle.

Les équations (1) et (2) entraînent la conservation des efforts dans le modèle complet :

$$dQ_p(z) + dQ_s(z) = \left(\gamma_p\, s_p + \gamma_s\, s_s\right) dz \qquad \textbf{(3)}$$

Le tassement du pieu et le tassement <u>moyen</u> du sol satisfont les équations complémentaires suivantes :

$$dy_p(z) = \frac{Q_p(z)}{s_p\, E_p}\, dz \qquad \textbf{(4)}$$

$$dy_s(z) = \frac{Q_s(z)}{s_s\, E_s}\, dz \qquad \textbf{(5)}$$

$E_p(z)$ est le module d'Young du matériau constitutif du pieu.

$E_s(z)$ désigne le module de déformation apparent du sol pour le niveau de chargement appliqué. Compte tenu de l'hypothèse de périodicité du modèle, ce module peut être assimilé à un module oedométrique dans le cas des sols compressibles (déformations latérales nulles aux bords du modèle).

L'équation (5) où figure la résultante verticale des charges appliquées au sol permet une estimation du tassement <u>moyen</u> du sol à la profondeur z.

L'interaction entre les deux domaines (pieu et volume de sol complémentaire) est supposée entièrement décrite dans chacune des couches par une fonction de transfert exprimant la dépendance du cisaillement τ avec le déplacement relatif entre les deux domaines :

$$\tau = f(y_p - y_s) \qquad \textbf{(6)}$$

F.2.4. Fonctions de transfert

Les fonctions de transfert relatives au cisaillement peuvent être définies de manière quelconque par l'utilisateur sous la forme d'une série de couples de valeurs (w_i, τ_i) ou en référence aux formulations semi-empiriques basées sur le module pressiométrique E_M et le frottement limite q_s qui ont été proposées par Frank et Zhao (1982) ou Monnet (2000).

F.2.4.1 Selon Frank et Zhao (1982)

Une loi de transfert pour le frottement et une loi pour la contrainte sous la pointe sont définies.

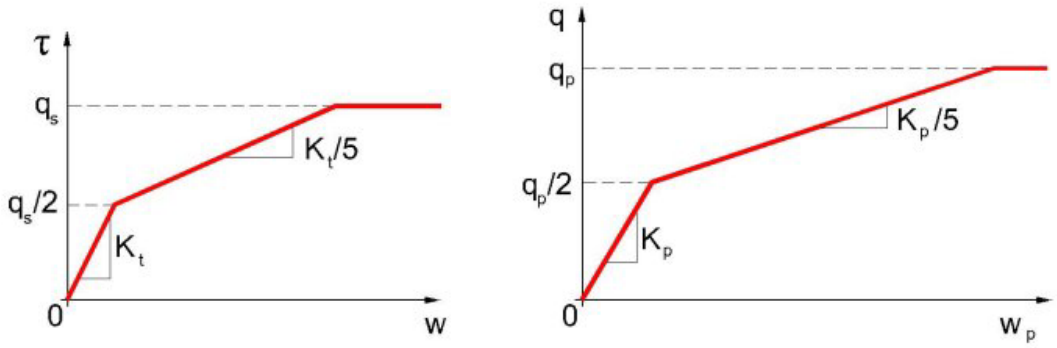


Figure F.3 Lois de mobilisation du frottement et de l'effort de pointe (Frank et Zhao, 1982)

Pour les pieux forés dans des sols fins:

$$K_t = \frac{2E_M}{D_S} \quad \text{et} \quad K_p = \frac{11E_M}{D_P} \qquad \textbf{(7)}$$

Pour les pieux forés dans des sols granulaires :

$$K_t = \frac{0.8E_M}{D_S} \quad \text{et} \quad K_p = \frac{4.8E_M}{D_P} \qquad \textbf{(8)}$$

A défaut de données expérimentales spécifiques, les mêmes règles sont retenues pour les pieux battus dans des sols fins ou granulaires.

F.2.4.2 Selon Monnet (2000)

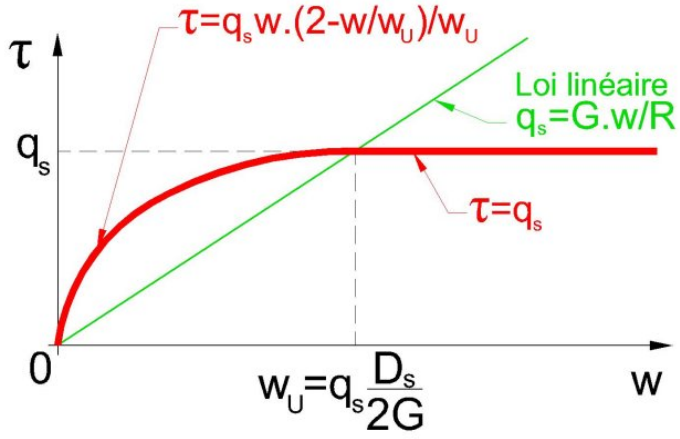


Figure F.4 Lois de mobilisation du frottement (Monnet, 2000)

$$\tau = q_s\, w\, \frac{\left(2-\frac{w}{w_u}\right)}{w_u} \qquad \textbf{(9)}$$

Avec

$$w_u = q_s \frac{1.5\alpha}{E_M} D_s \qquad \textbf{(10)}$$

Cette formulation est obtenue en assimilant le module de cisaillement G du sol à $E_M/3\alpha$.

F.2.4.3 Cas du frottement négatif

Dans Taspie+, la notion de fonction de transfert est appliquée au déplacement relatif $w = (y_p – y_s)$ plutôt qu'au déplacement absolu.

Lorsque le tassement du sol y_s est supérieur au tassement du pieu y_p, le frottement est négatif.

La mobilisation du frottement négatif en fonction du tassement relatif est la même que dans le domaine positif, au coefficient de pondération γ près, défini par l'utilisateur, qui est appliqué non seulement au frottement mais aussi au déplacement. Comme le montre la Figure F.5, les points limites sont déplacés selon une homothétie de facteur γ mais la pente des droites est inchangée.

Lorsque le coefficient de pondération est pris égal à 1, les courbes de mobilisation $\tau(w)$ sont symétriques par rapport à l'origine.

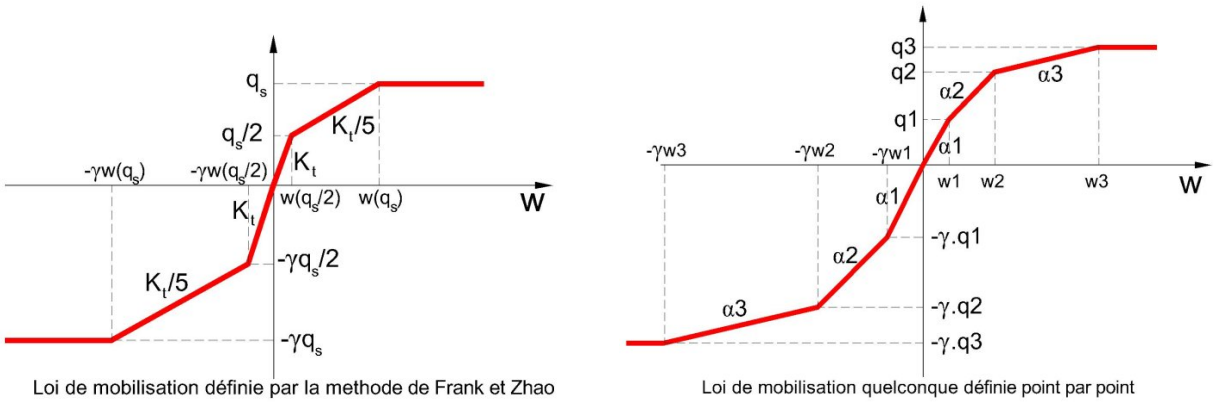


Figure F.5 Extension des lois de mobilisation du frottement pour les déplacements relatifs négatifs

F.2.5. Résolution

F.2.5.1 Méthode générale de résolution

Pour résoudre le système non linéaire constitué par les équations (1), (2), (4), (5) et (6), le module Taspie+ est doté de deux noyaux de calcul complémentaires :

- noyau principal : résolution matricielle par éléments finis ;
- noyau secondaire : résolution pas à pas par différences finies.

Le noyau principal (résolution matricielle) s'applique aux configurations où la courbe de transfert correspond à une fonction croissante monotone avec un palier unique de plastification (dernier palier). Ce qui couvre la grande majorité des cas.

Dans les cas où la courbe de transfert comporte un ou plusieurs paliers décroissants (dégradation, fatigue…), la formulation matricielle du noyau principal n'est plus valable et le noyau secondaire (résolution pas à pas) est automatiquement utilisé.

F.2.5.2 Modèle du pieu isolé (modèle 1a)

Le système d'équations (1), (2), (4), (5) et (6) est complété par les conditions limites suivantes :

- la valeur $Q_p(0)$ de la charge appliquée en tête du pieu ;
- la courbe de mobilisation de la contrainte sous la pointe du pieu ;
- la définition éventuelle d'un profil de tassement imposé $y_s(z)$ autour du pieu.

La solution obtenue garantit la compatibilité des tassements avec le frottement mobilisé et la charge reprise en pointe.

Le calcul fournit la distribution en tout point de l'effort normal, du tassement ainsi que du frottement latéral pour la charge appliquée. Les résultats sont complétés par la courbe de chargement (ou d'extraction) du pieu en tête (charge-déplacement) conduite jusqu'à rupture.

F.2.5.3 Modèle du pieu en maille (modèle 1b) – calcul à contraintes imposées (de type remblai)

Le système d'équations (1), (2), (4), (5) et (6) est complété par les conditions suivantes :

- la valeur Q(0) de la charge totale appliquée au sommet du modèle ;
- la fraction de la charge totale supportée directement par la tête du domaine pieu (facteur E_{QP}) ;
- la courbe de mobilisation de la contrainte sous la pointe du (domaine) pieu ;
- la condition de tassement nul à la base du domaine sol.

Le chargement étudié intègre également le poids des couches du profil déclarées rapportées par rapport à l'état d'origine. Ces couches (épaisseur totale ΣH_i) sont à l'origine de forces volumiques qui accroissent la résultante totale des forces appliquées au modèle de la quantité $(\Sigma H_i \gamma_i).S$, i désignant ici uniquement les couches rapportées et S la section du modèle (surface de la maille élémentaire étudiée).

La solution obtenue garantit la compatibilité en tout point du différentiel de tassement pieu/sol avec le frottement mobilisé et la charge reprise en pointe.

Le calcul fournit, pour la condition de chargement étudiée, la distribution en tout point de l'effort normal et du tassement se développant dans les deux domaines pieu et sol, ainsi que la distribution du frottement latéral à l'interface des deux domaines.

F.2.5.4 Modèle du pieu en maille (modèle 1b) – calcul à déformations imposées (de type dallage)

Le système d'équations (1), (2), (4), (5) et (6) est complété par les conditions suivantes :

- la valeur Q(0) de la charge totale appliquée au sommet du modèle ;
- la condition d'égalité du tassement du pieu et du tassement du sol en tête du modèle : $y_p(0) = y_s(0)$;
- la courbe de mobilisation de la contrainte sous la pointe du (domaine) pieu ;
- la condition de tassement nul à la base du domaine sol.

Le calcul de type dallage se distingue de celui de type remblai par le fait que la répartition de la charge en tête du modèle entre le pieu et le sol, représentée par le facteur E_{QP}, est un résultat et non pas une donnée du problème. Ce facteur est recherché automatiquement afin de satisfaire la condition d'égalité des tassements en tête. Ainsi, un calcul de type dallage correspond à plusieurs calculs de types "remblai" conduits selon un processus de recherche dichotomique.

Le chargement étudié intègre également le poids des couches du profil qui sont déclarées par l'utilisateur rapportées par rapport à l'état d'origine. Ces couches (épaisseur totale ΣH_i) sont à l'origine de forces volumiques qui accroissent la résultante totale des forces

appliquées au modèle de la quantité ($\Sigma H_i\gamma_i$).S, i désignant ici uniquement les couches rapportées et S la section du modèle (surface de la maille élémentaire étudiée).

Dans un calcul de type dallage, le matelas de répartition est généralement à traiter comme une couche rapportée sauf si un déblai préalable a été réalisé.

La solution obtenue garantit d'une part l'égalité du tassement du pieu et du tassement moyen du sol en tête du modèle, et d'autre part la compatibilité, en tout point, du différentiel de tassement pieu/sol avec le frottement mobilisé et la charge reprise en pointe.

Le calcul fournit, pour la condition de chargement total étudié, la distribution en tout point de l'effort normal et du tassement se développant dans les deux domaines pieu et sol, ainsi que la distribution du frottement latéral à l'interface des deux domaines.

F.2.6. Domaine de validité

F.2.6.1 Validité du choix des valeurs de frottement limite

Les valeurs de frottement limite sont définies par l'utilisateur pour chacune des couches.

De manière générale dans le cas des pieux ou inclusions, ces valeurs limites doivent être choisies en référence aux valeurs limites déduites d'essais de chargement axial de pieux réalisés selon une méthodologie identique, dans des couches de propriétés géotechniques comparables. A défaut de références expérimentales directes, les valeurs généralement adoptées sont celles de la norme d'application de l'Eurocode 7 pour les fondations profondes (NF P 94 – 262).

Dans les applications traitant de renforcement sous un remblai ou une couche de répartition, l'élément de pieu est supposé prolongé par un cylindre de section identique à la tête du pieu auquel sont affectées les propriétés du remblai ou de la couche de répartition (module E, poids volumique γ). Il doit être vérifié que la valeur limite q_s adoptée pour cette couche demeure compatible avec l'état des contraintes autour du pieu. Il est donc recommandé de comparer les valeurs q_s du frottement limite et τ du frottement mobilisé sur les éléments du pieu fictif aux valeurs de la contrainte verticale moyenne entre les inclusions.

Il est suggéré d'adopter le long du pieu fictif la valeur limite $q_s(z) = \sigma_s(z)$; cette hypothèse est en effet équivalente au choix de la valeur préconisée $K\tan\delta = 1$ pour traiter par la théorie du frottement négatif de Combarieu le cas des remblais surmontant des pieux ou des inclusions.

Dans les applications traitant du renforcement des sols, il est également nécessaire de vérifier la cohérence des valeurs de frottement limite q_s introduites avec l'état de contraintes régnant dans le sol, dans la partie soumise à frottement négatif. Ceci amène à vérifier que la condition suivante est satisfaite :

$$q_s \leq K\tan\delta\ \sigma'_s \qquad \textbf{(11)}$$

avec :

- $K\tan\delta$: coefficient de frottement négatif applicable à la couche considérée
- σ'_s : contrainte verticale dans le sol calculée au même niveau

Un assistant graphique facilite cette vérification de cohérence des données.

F.2.6.2 Validité du choix des valeurs du module de déformation E_s

Le module E_s défini pour chaque couche de sol est un module sécant qui exprime la relation entre le supplément moyen de contrainte verticale dans le sol et le tassement de cette couche :

$$E_s = \Delta\sigma_s/\Delta y_s \qquad \textbf{(12)}$$

Dans les couches compressibles et compte tenu des conditions imposées sur les faces extérieures du volume étudié, le module E_s peut être assimilé au module oedométrique E_{oed}.

Il est nécessaire de vérifier que la valeur E_s qui a été adoptée pour chaque couche est compatible avec le supplément de contrainte que le calcul détermine pour cette couche :

- dans une couche dont le comportement est le mieux représenté par le modèle oedométrique, la valeur du module sécant E_s doit être validée par un calcul de tassement de type oedométrique mené en parallèle et combinant le profil $\Delta\sigma_s(z)$ déterminé par le calcul Taspie+ avec les paramètres du modèle oedométrique ;
- la validité du module E_s peut aussi être appréciée au regard du niveau de déformation ε_z de chaque couche lorsqu'une loi de comportement plus élaborée est connue.

Sur la hauteur du matelas de répartition ou du remblai surmontant le pieu, les conditions de déformation ne peuvent plus être assimilées aux conditions oedométriques : en particulier à proximité de la tête des inclusions où la mobilisation du cisaillement τ provoque une rotation significative des contraintes. Comme il s'agit de couches généralement moins compressibles que les sols sous-jacents, la distinction entre module d'Young et module oedométrique peut néanmoins le plus souvent être ignorée au regard des valeurs respectives de tassement attendues sur la hauteur du matelas et celle du sol compressible.

La concentration des contraintes au dessus de la tête du pieu peut également amener à différencier la valeur du module attribué, sur la hauteur d'une couche de remblai, au domaine sol (valeur σ_s faible) et au domaine pieu (valeur σ_s forte) lorsque le matériau concerné révèle une dépendance marquée du module de déformation avec le niveau des contraintes.

F.2.6.3 Vérification de cohérence de l'état de contraintes dans le matelas

Conformément aux Recommandations ASIRI, il est nécessaire de vérifier la cohérence des contraintes calculées sur la tête d'inclusion et le sol au même niveau, vis-à-vis des caractéristiques de cisaillement attribuées à la couche de transfert de charge(ou du remblai, en l'absence d'une couche spécifique de transfert de charge).

$$\sigma_{inc}' \leq N_q\, \sigma_{sol}' + c'\, N_c \qquad \textbf{(13)}$$

Avec :

- σ_{inc}' : contrainte sur la tête d'inclusion
- σ_{sol}' : contrainte moyenne sur le sol au niveau des têtes
- c' : cohésion intergranulaire éventuelle du matériau constituant le matelas

N_q et N_c, coefficients de portance de Prandtl, doivent être évalués pour la valeur de l'angle de frottement du matelas à l'état critique.

Lorsque cette vérification n'est pas satisfaite, il est nécessaire de réduire le module de la couche de répartition à l'aplomb de l'inclusion (sans modifier celui attribué à la même couche, entre les inclusions) jusqu'à obtenir des contraintes σ_{inc}' et σ_{sol}' compatibles.

Cette démarche itérative revient à définir un module sécant du matelas, au dessus des inclusions, compatible avec le critère de plasticité qu'exprime la relation (13).

F.2.7. Extension du modèle 1b sous la pointe du pieu

Dans le cas d'un renforcement de sol (utilisation du modèle 1b) , il est recommandé de choisir une géométrie du domaine pieu telle que son diamètre équivalent soit pratiquement nul (valeur très faible non nulle) dans les sections situées à plus de 1,5 D_p sous la pointe du pieu (D_p diamètre équivalent en pointe du pieu). Ces dispositions, fondées sur le rapport existant entre les courbes de mobilisation en pointe et en frottement selon Frank et Zhao, assurent en effet que l'effort mobilisé en pointe du pieu est intégralement transmis au domaine sol à plus de 1,5 D_p sous la pointe du pieu et que sous cette profondeur le domaine sol devient de section égale à celle de la maille de calcul.

Il est nécessaire d'attribuer au tronçon du domaine pieu situé à moins de 1,5D_p sous la pointe réelle du pieu un frottement fictif q_s^* tel que la résultante limite sur le cylindre de hauteur 1,5 D_p soit égale à la résultante limite sous la pointe de l'inclusion [($\pi D_p^2/4$)x q_p]. Cette condition est réalisée avec : $q_s^* = q_p/6$.

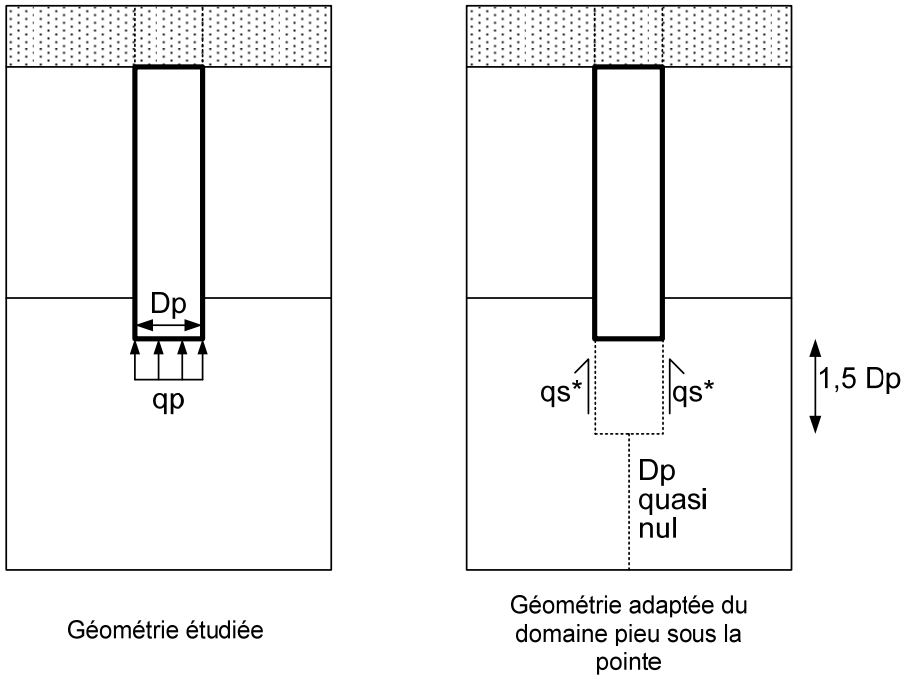


Figure F.6 Extension du modèle sous la pointe du pieu

F.2.8. Calculs de capacité portante

Dans tous les cas, le programme calcule les valeurs réglementaires suivantes (selon la norme NF P 94 262) de capacité portante :

- valeurs limites des charges ultimes en frottement et en pointe (sans pondération) ;
- valeur limite de la charge critique du fluage (sans pondération) ;
- les charges admissibles à l'E.L.S (en combinaisons quasi-permanente et caractéristique) et à l'E.L.U (en combinaisons fondamentale et accidentelle).

Ces calculs sont menés pour la totalité de la longueur du pieu (toutes les couches de sol sont prises en compte).

Pour un calcul de type pieu et massif de sol associé, le programme recherche la cote où la charge dans le pieu est maximale (plan neutre), calcule la charge ultime et la charge limite du fluage (selon les règles de la norme NF P 94 -262) pour le tronçon de pieu placé sous cette cote, et affiche la sécurité globale disponible par rapport à la charge maximale obtenue.

F.2.9. Estimation des raideurs en tête

Dans le cas d'un calcul de type "pieu isolé", un calcul de raideur équivalente en tête de pieu est mené à la fois pour la charge de service appliquée en tête ainsi que pour une charge égale à 70% de la charge limite de fluage. Cette dernière est utilisée par défaut comme paramètre d'entrée à un calcul de groupe de pieux dans le module GROUPIE. La raideur est exprimée comme le rapport de la charge en tête du pieu au déplacement correspondant.

Pour un calcul de type pieu et cylindre de sol associé de sol, les raideurs surfaciques équivalentes sont estimées pour la charge Q(0) définie par l'utilisateur. La raideur surfacique au droit du pieu est obtenue en divisant la contrainte en tête du domaine pieu par le déplacement en tête du domaine pieu et la raideur surfacique au droit du domaine sol en divisant la contrainte verticale moyenne appliquée en tête du domaine sol par le tassement moyen à ce niveau.

Les recommandations ASIRI explicitent comment exploiter les raideurs surfaciques ainsi obtenues pour établir une distribution simplifiée équivalente de raideurs, autour de chaque inclusion et entre les inclusions, apte à fournir une estimation représentative des moments dans le dallage Cette distribution équivalente de raideurs surfaciques peut être utilisée dans un modèle Tasplaq du dallage pour établir les sollicitations qu'il subit sous le chargement appliqué.

F.3. MANUEL D'UTILISATION

On présente dans ce chapitre :

- les paramètres d'entrée du module Taspie+.
  Certaines zones ne peuvent recevoir que des données ayant une signification physique (par exemple, un module de déformation de sol E_{sol} doit toujours être strictement positif).

  La fenêtre d'entrée des paramètres de calcul Taspie + est constituée de 6 onglets distincts. Les données à compléter sur chaque onglet dépendent parfois de certains choix effectués par l'utilisateur : par exemple, les données à compléter pour un calcul de "pieu isolé avec ou sans tassement imposé du sol" ne sont pas les mêmes que pour un calcul d'un "pieu+maille de sol associée".

  Nota : il est possible, dans le module Taspie+, de traiter un pieu unique, ou plusieurs pieux correspondant à des configurations différentes de pieux pour un même projet (voir le chapitre F.3.1 ci-dessous).
- les résultats fournis par le module Taspie+. Là aussi, ils dépendent en partie des données saisies par l'utilisateur, et notamment du type de calcul.

Ce chapitre ne détaille pas l'interface utilisateurs proprement dite et ses manipulations (boutons, menus, etc) : ces aspects sont traités dans la partie C du manuel.

F.3.1. Gestion des pieux

Le module Taspie+ permet de traiter un ou plusieurs pieux dans le cadre d'un projet Foxta donné, mais l'utilisateur ne peut travailler que sur un de ces pieux à la fois : le pieu "actif" est affiché au-dessus des onglets de la fenêtre de saisie des données.

- Lors de la première ouverture du module Taspie+ pour un projet donné, le module comporte un seul pieu (Pieu 1/1). L'utilisateur doit donc compléter ce premier pieu, et peut ensuite, si nécessaire, créer des pieux supplémentaires (voir ci-dessous) ;
- Lors de l'ouverture d'un module Taspie+ déjà complété, le pieu affiché par défaut est le pieu 1/n (n étant le nombre total de pieux déjà créés dans le module). Il est ensuite possible de sélectionner un autre pieu, d'ajouter des pieux ou d'en supprimer.

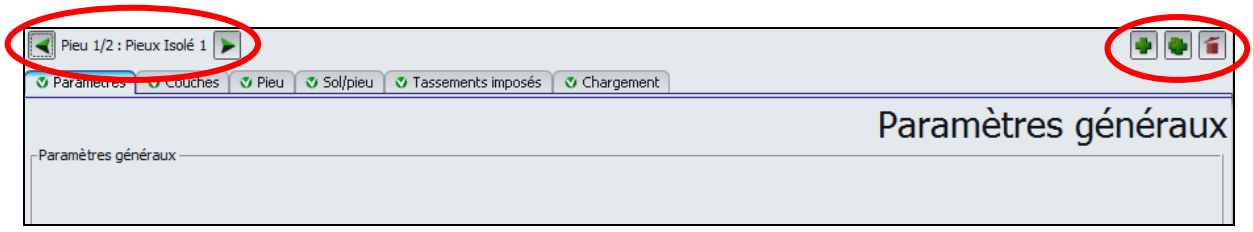


Figure F.7 Gestion des pieux dans le module Taspie+

Les manipulations possibles sur les pieux dans le module Taspie+ sont les suivantes :

- ajout d'un pieu : cliquer sur le bouton : Foxta ajoute un nouveau pieu au projet, indépendant du précédent, avec les mêmes champs de saisie. Son numéro sera automatiquement incrémenté ;
- pour dupliquer le pieu courant, cliquer sur le bouton : Foxta ajoute au projet un pieu identique au pieu courant. Les données sont dupliquées dans ce nouveau pieu mais elles restent modifiables ;
- pour supprimer le pieu courant, cliquer sur le bouton ;
- pour afficher le pieu suivant ou le pieu précédent, cliquer sur le bouton ou sur .

Comme indiqué précédemment, on ne peut "travailler" que sur un pieu à la fois : la démarche d'utilisation est donc de sélectionner le pieu voulu, compléter/modifier ses données, lancer le calcul puis afficher les résultats pour ce pieu. L'utilisateur peut ensuite sélectionner un autre pieu existant ou créer un autre pieu, et répéter ces opérations.

Les chapitres suivants décrivent l'utilisation de Taspie+ pour un pieu donné.

F.3.2. Onglet "Paramètres"

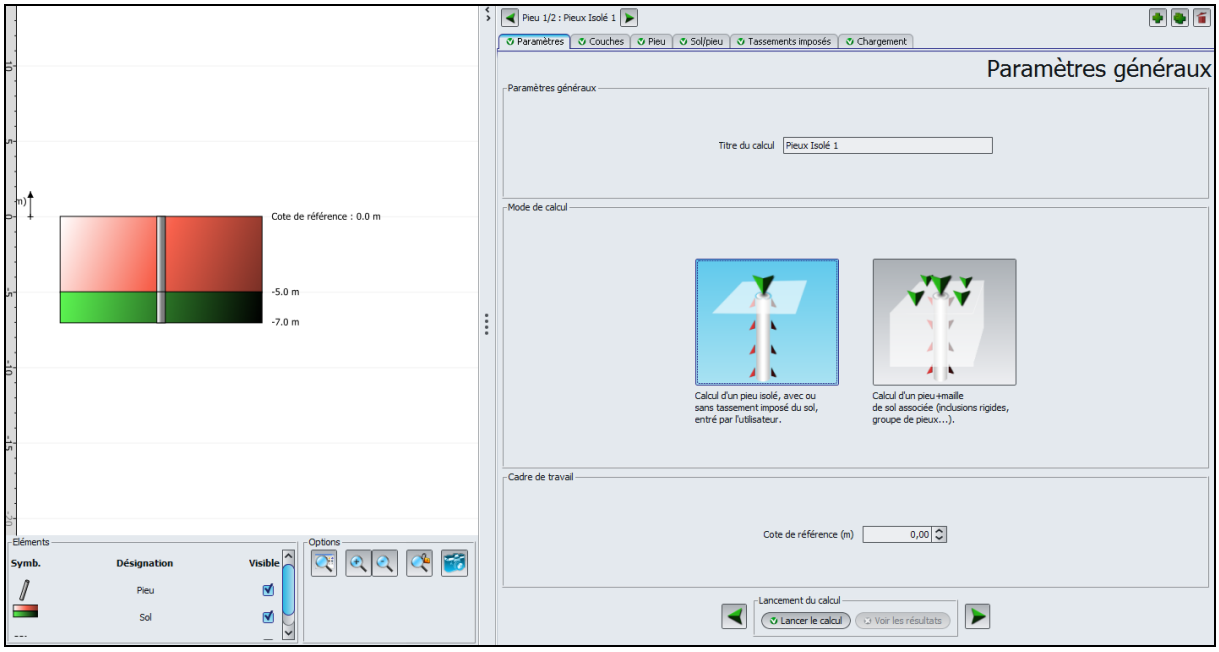


Figure F.8 Onglet "Paramètres"

F.3.2.1 Cadre "Paramètres généraux"

Indiquer le titre du calcul.

F.3.2.2 Cadre "Mode de calcul"

Sélectionner :

- soit "Calcul d'un pieu, avec ou sans tassement imposé du sol, entré par l'utilisateur" ;
- soit "Calcul d'un pieu + maille de sol associée (inclusions rigides, groupe de pieux,..).

F.3.2.3 Cadre "Cadre de travail"

Indiquer la cote de référence (en m).

Ci-dessous un tableau récapitulatif des paramètres généraux :

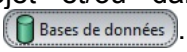
Désignation	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire
Titre	-	-	Toujours	Oui
Mode de Calcul	-	Pieu isolé	Toujours	Oui
Cote de référence	m	0,0	Toujours	Oui

Tableau F.1 Récapitulatif des paramètres généraux

F.3.3. Onglet "Couches"

Cet onglet permet la définition des couches : les caractéristiques à compléter dans le tableau varient avec le type de calcul choisi : voir les sous-chapitres F.3.3.1 et F.3.3.2.

IMPORTANT : par convention Taspie+, la base du pieu est supposée au niveau de la base de la dernière couche de sol définie. Il faut donc arrêter la coupe de sol au niveau de la base du pieu (sauf dans certains cas "pieu + maille associée", qui nécessitent un prolongement du modèle sous la pointe des pieux, voir aussi chapitre F.2.7).

Foxta offre la possibilité d'enregistrer les couches de sol dans la base de données des sols du projet et/ou dans la base de données globale des sols en cliquant sur le bouton 

.

Ceci permet d'enregistrer les couches de sol avec leurs paramètres et d'éviter de les ressaisir lors de la création d'un nouveau pieu dans le module Piecoef+ ou d'un autre projet Foxta.

L'utilisation de la base de données des sols est décrite en détail dans la partie C du manuel.

F.3.3.1 Calcul d'un pieu isolé (sans ou avec tassement imposé du sol)

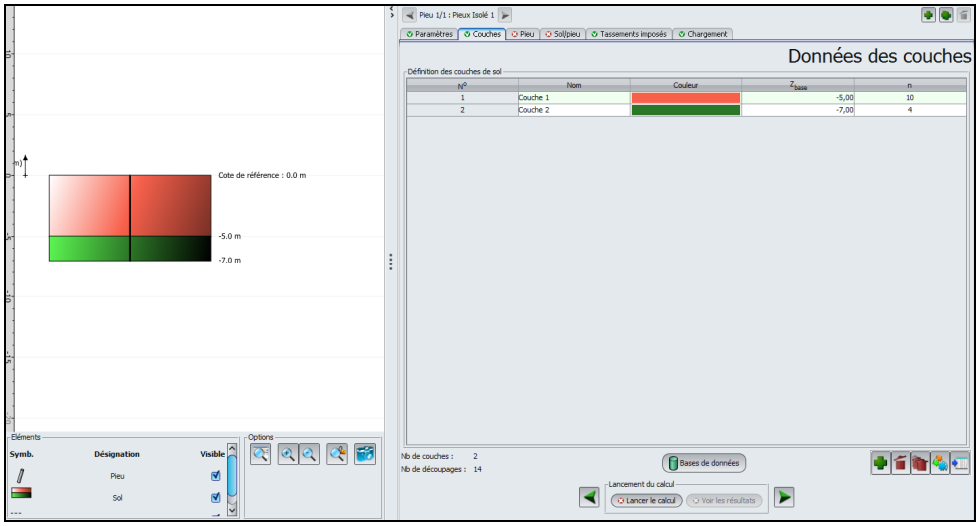


Figure F.9 Onglet "Couche" pour un calcul d'un pieu isolé avec ou sans tassement imposé du sol

Ci-dessous un tableau récapitulatif des paramètres de définition des couches :

Désignation	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire	Contrôles locaux
Nom de la couche	-	"Couche i"	Toujours	Oui	-
Couleur de la couche	-	Couleur par défaut	Toujours	Oui	-
Z : cote de base de la couche	m	1 m plus bas que la base de la couche au-dessus	Toujours	Oui	Valeurs strictement décroissantes avec la profondeur
n : nombre de subdivisions de la couche	-	10	Toujours	Oui	> 0

Tableau F.2 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du sol - Calcul de type "Pieu isolé"

F.3.3.2 Calcul d'un pieu + maille de sol associée

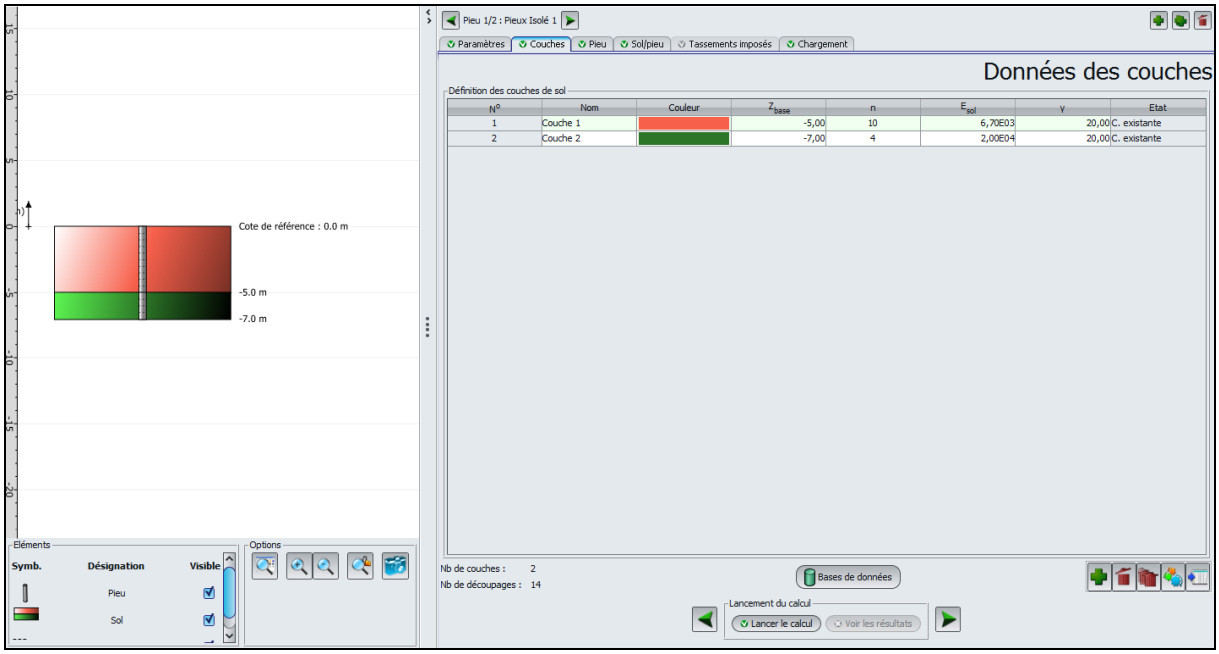


Figure F.10 Onglet "Couche" pour un calcul d'un pieu + maille de sol associée

Les données définies pour le pieu isolé sont nécessaires ici également (voir Tableau F.2).

Les données complémentaires suivantes sont requises également pour ce type de calcul :

Désignation	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire	Contrôles locaux
E_{sol} : module de déformation de la couche	kPa	-	Toujours	Oui	> 0
γ (ou γ') : poids volumique **net** de la couche	kN/m^3	-	Toujours	Oui	> 0
Etat de la couche (voir chapitre F.2.5)	-	Existante	Toujours	Oui	Valeurs possibles : couche apportée ou couche existante. une couche existante ne peut pas être définie au-dessus d'une couche apportée.

Tableau F.3 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du sol - Calcul de type "Pieu + maille associée"

Le poids volumique « net » de la couche est à saisir en fonction de la position de la nappe :

- saisir le poids volumique total dans le cas où la couche se situe au dessus de la nappe ;
- saisir le poids volumique déjaugé dans le cas où la couche se situe sous le toit de la nappe.

Le module de déformation de la couche doit être choisi en référence au chemin de contrainte qui peut être anticipé : dans les couches compressibles, celui-ci est proche d'un chargement de type œdométrique, aussi, le module œdométrique est généralement bien adapté pour caractériser le comportement des couches compressibles.

Lorsque les couches sont surconsolidées, le module de déformation à saisir est le module sécant équivalent pour le niveau de surcharge appliqué au sol. Celui-ci peut être défini par ajustements successifs en tenant compte de la contrainte verticale moyenne calculée dans le sol.

F.3.4. Onglet "Pieu"

Cet onglet permet la définition du pieu proprement dit : géométrie, mode de mise en œuvre et module de déformation. Le choix de certaines caractéristiques conditionne le type de données requises.

F.3.4.1 Cadre "Type de pieu"

Ci-dessous le détail des sélections possibles (voir des illustrations sur les copies d'écran du chapitre F.3.4.2).

Désignation	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire	Contrôles locaux
Mode de mise en œuvre du pieu	-	Sans refoulement	Toujours	Oui	Valeurs possibles : avec ou sans refoulement
Type de section du pieu	-	Circulaire	Toujours	Oui	Valeurs possibles : section circulaire ou quelconque

Figure F.11 Récapitulatif des paramètres nécessaires dans le cadre "Type de pieu"

F.3.4.2 Cadres "Paramètres de pieu" et "Définition du pieu dans chaque couche"

Ci-après 2 exemples de copie d'écran illustrant différentes combinaisons des choix section circulaire/quelconque et module/diamètre constants ou non le long du pieu.

Dans le cas d'une section circulaire, celle-ci est supposée "pleine" et seul le diamètre suffit pour définir la géométrie exacte du pieu dans chaque couche (c'est-à-dire pour calculer le périmètre et la section).

Dans le cas d'une section quelconque, on indique le périmètre du pieu qui sera utilisé pour le calcul de l'effort dû au frottement latéral, et la section du pieu qui sera utilisée pour le calcul de rigidité axiale du pieu (ES) ainsi que pour l'effort en pointe.

D'autre part, l'inclinaison du pieu dans le cadre "Paramètres du pieu" ne peut être modifiée que dans le cas d'un calcul de type "Pieu isolé". Pour un calcul de type "Pieu + maille associée", l'inclinaison est automatiquement fixée à 0° (pieu vertical uniquement).

Pour les paramètres indiqués comme constants le long du pieu par l'utilisateur dans le cadre "Paramètres du pieu", il convient de définir leur valeur dans ce même cadre, et la valeur est alors automatiquement reportée (non modifiable) dans le tableau dessous (cas de la Figure F.13).

Par contre, pour les paramètres non cochés comme constants le long du pieu, l'utilisateur doit compléter la valeur de paramètre pour chaque couche de sol (Taspie+ reprend automatiquement la liste des couches définies sur l'onglet précédent, cas de la Figure F.12).

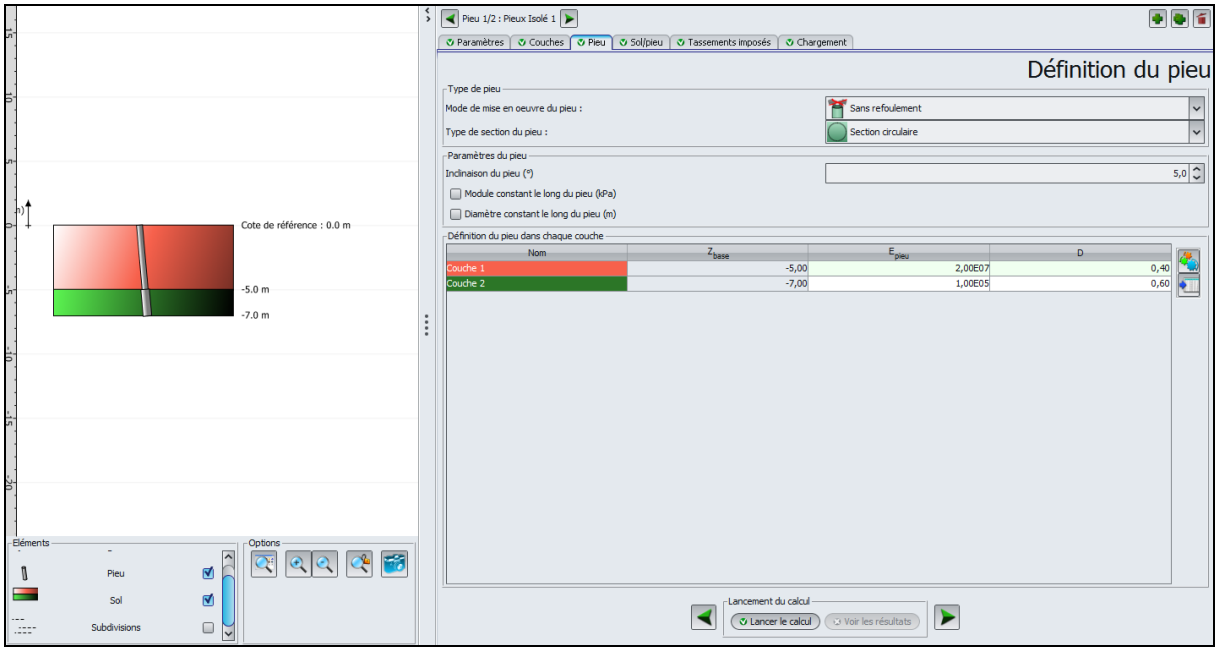


Figure F.12 Onglet "Pieu" pour un calcul de pieu isolé de section circulaire, de module variable le long du pieu

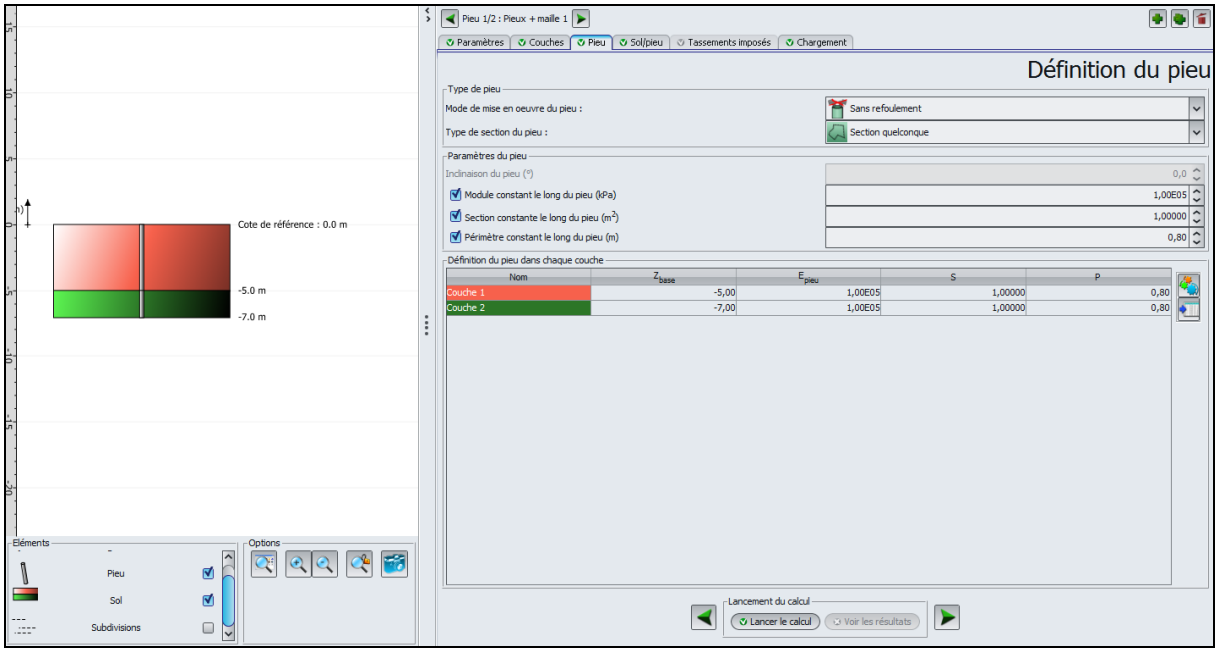


Figure F.13 Onglet "Pieu" pour un calcul de type "pieu + maille associée", avec un pieu de section quelconque et de caractéristiques constantes le long du pieu

Le tableau ci-dessous récapitule les paramètres de définition du pieu en fonction du type de section choisi (circulaire ou quelconque) et du type de calcul :

Désignation	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire	Contrôles locaux
Inclinaison du pieu	°	0	Toujours	Oui	Modifiable seulement pour les calculs de type "pieu isolé" -90 °< incl < 90°
$\mathbf{E}_{pieu}$: module d'Young du pieu	kPa	-	Toujours	Oui	> 0
D : diamètre de la section	m	-	Si section circulaire	Oui	> 0
P : périmètre de la section	m	-	Si section quelconque	Oui	> 0
S : section	m²	-	Si section quelconque	Oui	> 0

Tableau F.4 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du pieu

Astuce *:* il est possible de cocher d'abord la case "Module constant le long du pieu", d'entrer la valeur la plus utilisée, puis de décocher ladite case et de ne modifier que les couches ayant des valeurs différentes.

F.3.5. Onglet "Sol/pieu"

Cet onglet permet la définition des lois de mobilisation du frottement latéral et du terme de pointe. Il comporte trois cadres différents.

F.3.5.1 Cadre "Loi de mobilisation du frottement latéral du sol et de l'effort de pointe"

Sélectionner dans la liste déroulante l'une des lois de mobilisation proposées :

- à partir de valeurs pressiométriques (loi de Frank et Zhao). Voir aussi le chapitre F.2.4.1 ;
- à partir de valeurs pressiométriques (loi de Monnet). Voir aussi le chapitre F.2.4.2 ;
- entrée point par point.

Ce choix s'appliquera à la fois pour le frottement latéral et pour le terme de pointe, et conditionnera les données affichées dans les 2 cadres dessous.

Les sous-chapitres F.3.5.2 et F.3.5.3 décrivent les données à saisir selon les lois de mobilisation choisies.

Quelle que soit la loi de comportement choisie, la partie graphique représente soit la loi de mobilisation du frottement latéral (cf Figure F.14), soit la loi de mobilisation du terme de pointe (cf Figure F.15), soit les 2 (cf Figure F.16).

L'affichage par défaut correspond au cadre actif (par exemple, lorsque vous travaillez dans le cadre "Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe", c'est la courbe de mobilisation de la contrainte en point qui s'affiche), mais il est possible de forcer l'affichage sur la ou les courbes voulues grâce aux cases à cocher situées sous les courbes.

Concernant les courbes de mobilisation du frottement latéral, la courbe affichée correspond à la couche sélectionnée (la légende sous la courbe confirme d'ailleurs la couche concernée, voir Figure F.14).

D'autre part, les courbes ne s'affichent que lorsque les données correspondantes sont complètement saisies et valides.

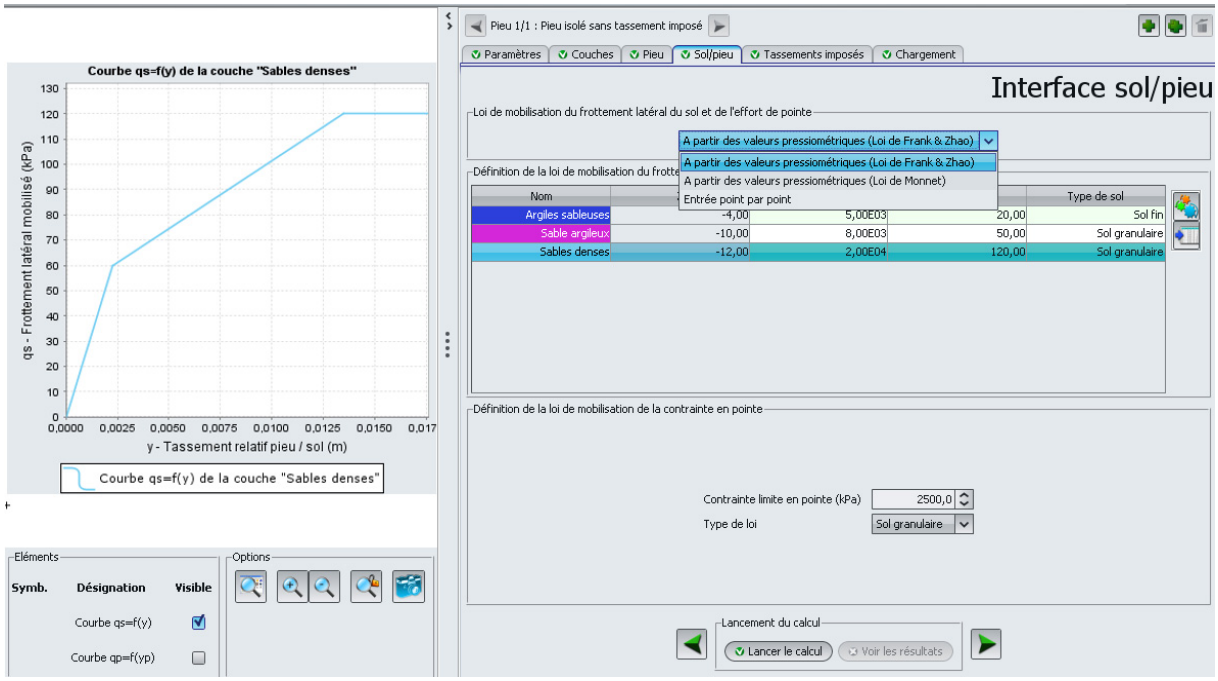

Courbe qs=f(y) de la couche "Sables denses"
qs - Frottement latéral mobilisé (kPa)
y - Tassement relatif pieu / sol (m)
Courbe qs=f(y) de la couche "Sables denses"
Pieu 1/1 : Pieu isolé sans tassement imposé
Paramètres
Couches
Pieu
Sol/pieu
Tassements imposés
Chargement
Interface sol/pieu
Loi de mobilisation du frottement latéral du sol et de l'effort de pointe
A partir des valeurs pressiométriques (Loi de Frank & Zhao)
A partir des valeurs pressiométriques (Loi de Monnet)
Entrée point par point
Définition de la loi de mobilisation du frotte
Nom
Type de sol
Argiles sableuses -4,00 5,00E03 20,00 Sol fin
Sable argileux -10,00 8,00E03 50,00 Sol granulaire
Sables denses -12,00 2,00E04 120,00 Sol granulaire
Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe
Contrainte limite en pointe (kPa) 2500,0
Type de loi Sol granulaire
Lancement du calcul
Lancer le calcul
Voir les résultats
Eléments
Symb.
Désignation
Visible
Courbe qs=f(y)
Courbe qp=f(yp)
Options

Figure F.14 Onglet "Sol/pieu"

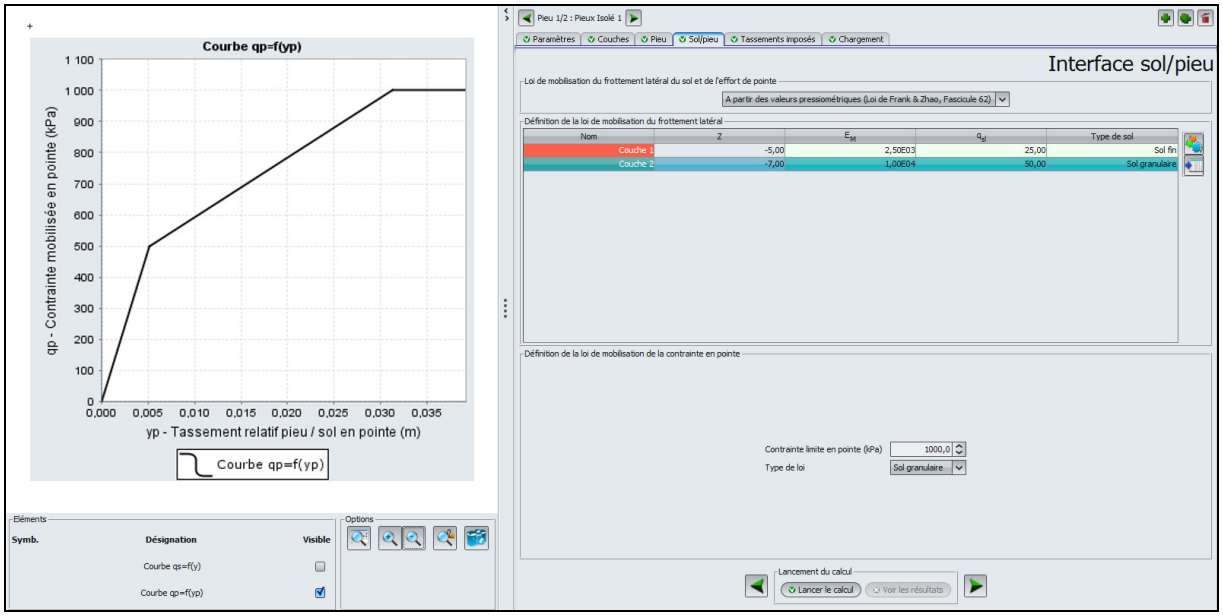

Courbe qp=f(yp)
qp - Contrainte mobilisée en pointe (kPa)
yp - Tassement relatif pieu / sol en pointe (m)
Courbe qp=f(yp)
Pieu 1/2 : Pieux Isolé 1
Interface sol/pieu
Loi de mobilisation du frottement latéral du sol et de l'effort de pointe
A partir des valeurs pressiométriques (Loi de Frank & Zhao, Fascicule 62)
Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral
Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe
Contrainte limite en pointe (kPa) 1000,0
Type de loi Sol granulaire
Lancement du calcul
Lancer le calcul
Voir les résultats

Figure F.15 Onglet "Sol/pieu" : affichage de la courbe qp = f(yp)

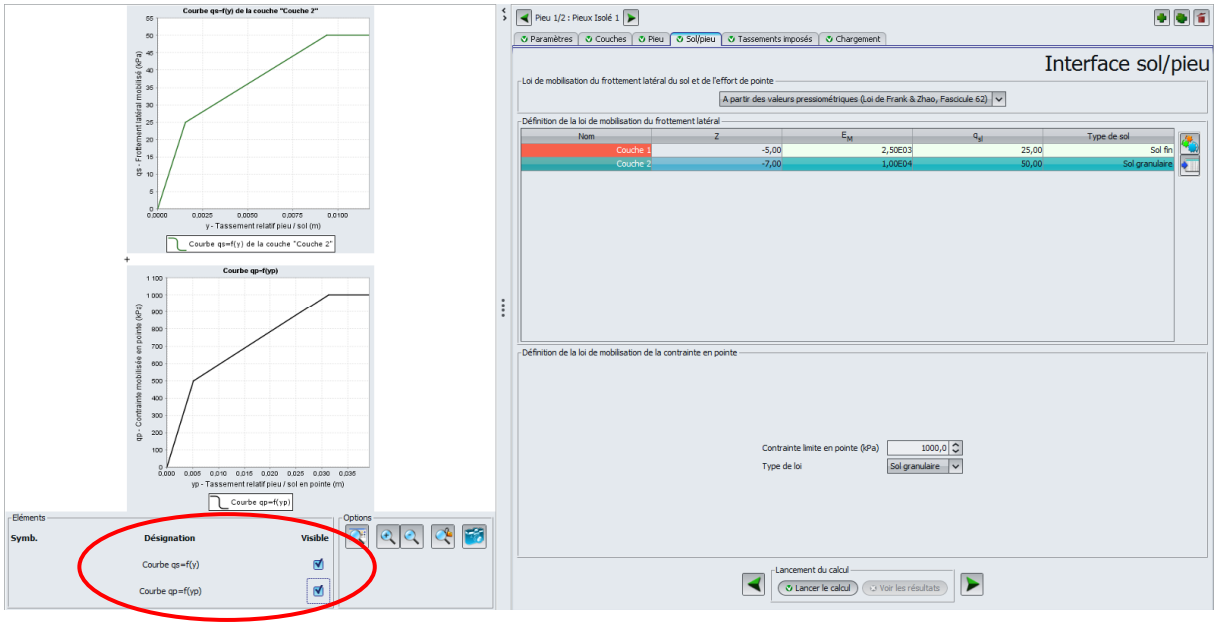


Figure F.16 Onglet "Sol/pieu" : affichage des 2 courbes qs=f(y) et qp = f(yp)

F.3.5.2 Loi de mobilisation du frottement latéral

Voir aussi le chapitre F.2.4.

F.3.5.2.1 Loi de Frank et Zhao

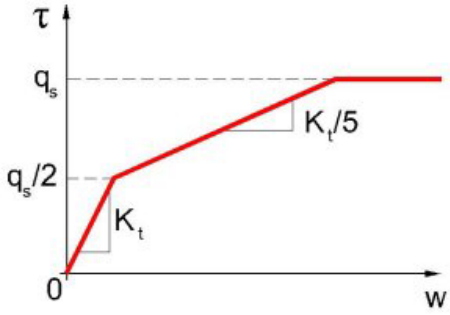


Figure F.17 Loi de mobilisation du frottement de Frank et Zhao

Pour cette loi, la définition de la mobilisation du frottement latéral se fait dans le cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral".

Les 2 premières colonnes du tableau de ce cadre sont pré-remplies en fonction de la définition des couches réalisée précédemment. Le nombre de lignes est limité au nombre de couches déclarées dans l'onglet "Couches".

Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral

Nom	Z	E_M	q_{sl}	Type de sol
Couche 1	-5,00	2,50E03	25,00	Sol fin
Couche 2	-7,00	1,00E04	50,00	Sol granulaire

Figure F.18 Cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral" – Loi de Frank & Zhao

Le tableau ci-dessous récapitule les paramètres du frottement à compléter pour la loi de Frank & Zhao :

Désignation	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire	Contrôle locaux
N°	-	-	Toujours	Oui	Complétées automatiquement
Z : cote de la base de la couche	m	-	Toujours	Oui	
E_M : module pressiométrique	kPa	-	Toujours	Oui	> 0
q_{sl} : frottement unitaire limite	kPa	-	Toujours	Oui	> 0
Type de sol	-	Sol fin	Toujours	Oui	Choix possibles : sol fin ou sol granulaire

Tableau F.5 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du frottement (loi de Frank & Zhao)

F.3.5.2.2 Loi de Monnet

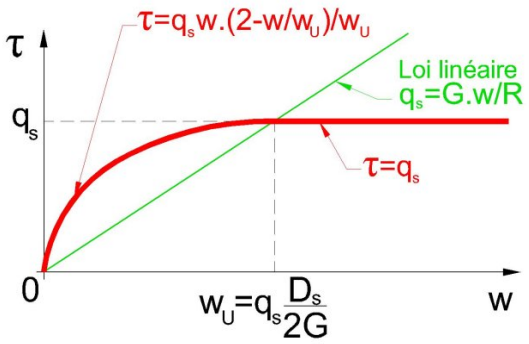


Figure F.19 Loi de mobilisation du frottement de Monnet

Pour cette loi également, la définition de la mobilisation du frottement latéral se fait dans le cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral".

Comme précédemment, les 2 premières colonnes du tableau de ce cadre sont pré-remplies en fonction de la définition des couches réalisée précédemment. Le nombre de lignes est limité au nombre de couches déclarées dans l'onglet "Couches".

Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral

Nom	Z	E_M	q_{sl}	α
Couche 1	-5,00	2,50E03	25,00	0,30
Couche 2	-7,00	1,00E04	50,00	0,25

Figure F.20 Cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral" – Loi de Monnet

Ci-dessous un tableau récapitulatif des paramètres du frottement pour la loi de Monnet :

Désignation	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire	Contrôle locaux
N°	-	-	Toujours	Oui	Complétées automatiquement
Z : cote de la base de la couche	m	-	Toujours	Oui	
E_M : module pressiométrique	kPa	-	Toujours	Oui	> 0
q_{sl} : frottement unitaire limite	kPa	-	Toujours	Oui	> 0
α : coefficient rhéologique de Ménard	-	-	Toujours	Oui	0 < α ≤ 1

Tableau F.6 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du frottement (loi de Monnet)

F.3.5.2.3 Lois de mobilisation entrées point par point

Dans ce cas, la saisie des paramètres se fait via le cadre "Définition manuelle point par point de la loi de mobilisation de frottement latéral".

Il convient de saisir une série de couples de valeurs (y = tassement relatif pieu/sol ; q_{sl} = frottement unitaire mobilisé) pour chacune des couches définies.

Cadre "Rappel des couches" :

- Sélectionner une couche (parmi celles définies précédemment) pour définir la loi q_{sl} = f(y) pour cette couche.

  Nota : il faut définir une loi q_{sl} = f(y) pour chaque couche.

Cadre "Loi q_{sl} = f(y)" :

- Saisir la série voulue de couples de valeurs (y ; q_{sl}).

  Nota : cliquer sur le bouton pour ajouter une ligne dans le tableau.

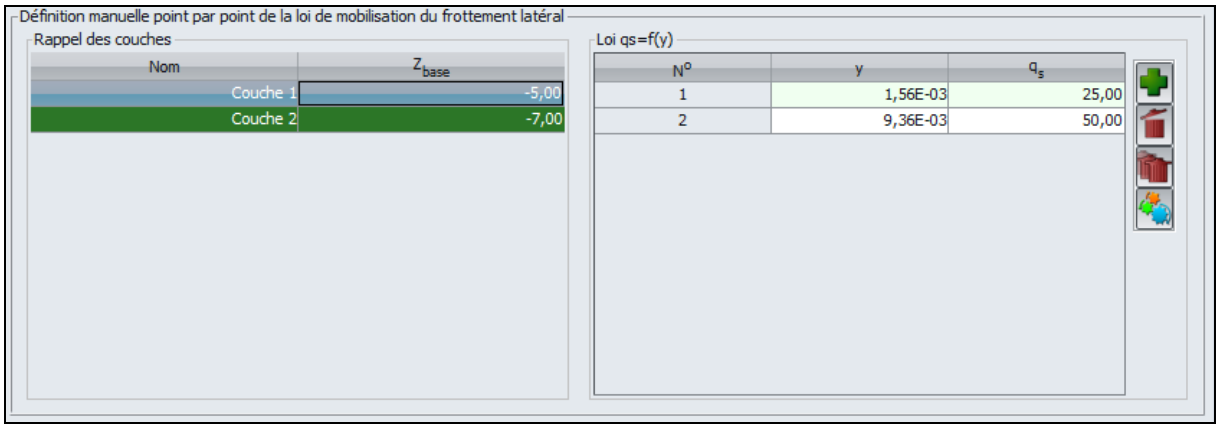


Figure F.21 Cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral" – Entrée point par point

Ci-dessous un tableau récapitulatif des paramètres du frottement :

Désignation	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire	Contrôles locaux
y : tassement relatif pieu/sol	m	-	Toujours	Oui	≥ 0 et valeurs strictement croissantes
q_{sl} : frottement unitaire mobilisé	kPa	-	Toujours	Oui	≥ 0

Tableau F.7 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du frottement – Entrée point par point

Pour chaque couche, la loi q_{sl} = f(y) doit comporter au moins un point différent de l'origine.

Rappel : dans le cas où la loi de mobilisation du frottement latéral pour une des couches au moins comporte un palier intermédiaire décroissant ou constant, Taspie+ passera automatiquement au mode de calcul pas-à-pas (voir chapitre F.3.8).

F.3.5.3 Loi de mobilisation de la contrainte en pointe

La définition de la mobilisation de la contrainte en pointe se fait dans le cadre "Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe".

F.3.5.3.1 Lois de Frank et Zhao et de Monnet

Pour ces 2 lois, Taspie+ génère automatiquement une loi à trois de paliers de type Frank et Zhao (Figure F.3) dont la construction est contrôlée par quatre paramètres (voir chapitre F.2.4.1) :

- le module pressiométrique considéré pour la **dernière** couche du modèle ;
- le diamètre équivalent de la section du pieu dans la **dernière** couche du modèle ;
- la contrainte limite en pointe q_{pl} à définir par l'utilisateur ;
- le type de sol à considérer pour le comportement en pointe à choisir par l'utilisateur.

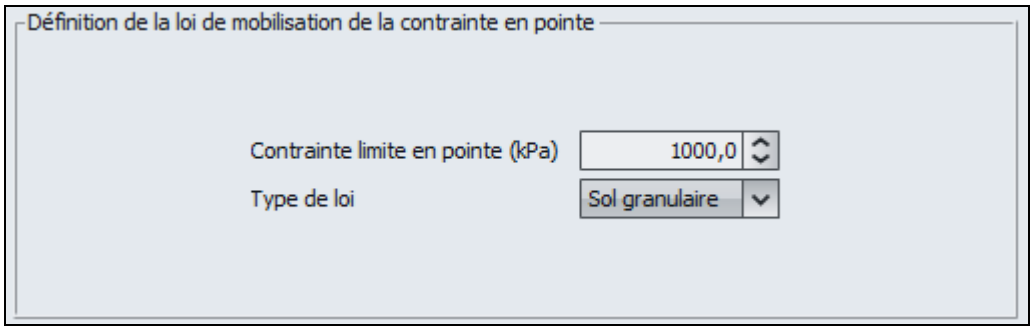

Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe
Contrainte limite en pointe (kPa)
1000,0
Type de loi
Sol granulaire

Figure F.22 Cadre "Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe" – Lois Frank&Zhao ou Monnet

Ci-dessous un tableau récapitulatif des paramètres nécessaires :

Désignation	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire	Contrôle locaux
Contrainte limite en pointe q_{pl}	kPa	-	Toujours	Oui	> 0
Type de loi	-	Sol granulaire	Toujours	Oui	Choix possibles : sol granulaire ou sol fin

Tableau F.8 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe (lois de Frank&Zhao ou Monnet)

Nota : dans le cas d'une caractérisation à partir des valeurs pressiométriques (resp. pénétrométriques), la contrainte limite en pointe q_{pl} est prise égale à k_p x pl_e (resp. k_c x q_{ce}), où k_p (resp. k_c) est le facteur de portance pressiométrique (resp. pénétrométrique) et pl_e (resp. q_{ce}) est la pression limite nette équivalente (resp. résistance en pointe équivalente) sous la pointe de la fondation, au sens de la norme NF P 94 262.

F.3.5.3.2 Lois de mobilisation entrées point par point

Dans le cas où la loi de mobilisation de l'effort en pointe est entrée point par point $q_p = f(y)$, l'utilisateur saisit les valeurs de la courbe de mobilisation, selon le même principe que pour le frottement latéral (voir chapitre F.3.5.2.3).

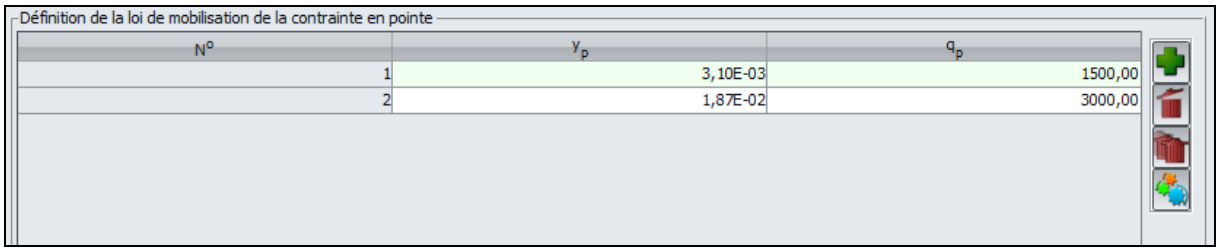


Figure F.23 Cadre "Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe" – Entrée point par point

Ci-dessous un tableau récapitulatif des paramètres nécessaires au calcul :

Désignation	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire	Contrôles locaux
y_p : tassement relatif pieu/sol en pointe	m	-	Toujours	Oui	≥ 0 et valeurs strictement croissantes
q_p : contrainte limite en pointe	kPa	-	Toujours	Oui	≥ 0

Tableau F.9 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe (entrée point par point)

La loi $q_p = f(y)$ doit comporter au moins un point différent de l'origine.

Rappel : dans le cas où la loi de mobilisation de la contrainte en pointe comporte un palier intermédiaire décroissant ou constant, Taspie+ passera automatiquement au mode de calcul pas-à-pas (voir chapitre F.3.8).

F.3.6. Onglet "Tassement imposé"

Cet onglet n'est accessible que dans le cas d'un calcul de type "Pieu isolé".

- Cocher la case si vous souhaitez "Définir un profil de tassement imposé du sol".

Si un profil de tassement imposé du sol est défini, le frottement latéral sol/pieu et la contrainte en pointe ne sont pas fonctions du seul tassement du pieu, mais du tassement relatif pieu/sol.

F.3.6.1 Cadre "Profil de tassement imposé du sol"

Ce cadre n'est accessible que si la case à cocher "Définir un profil de tassement imposé du sol" a été activée.

Les valeurs du tassement imposé du sol sont à définir par défaut aux cotes représentatives du toit des différentes couches ainsi qu'à la base du modèle (soit en n+1 points où n désigne le nombre total des couches).

Par convention, le tassement est pris positif vers le bas.

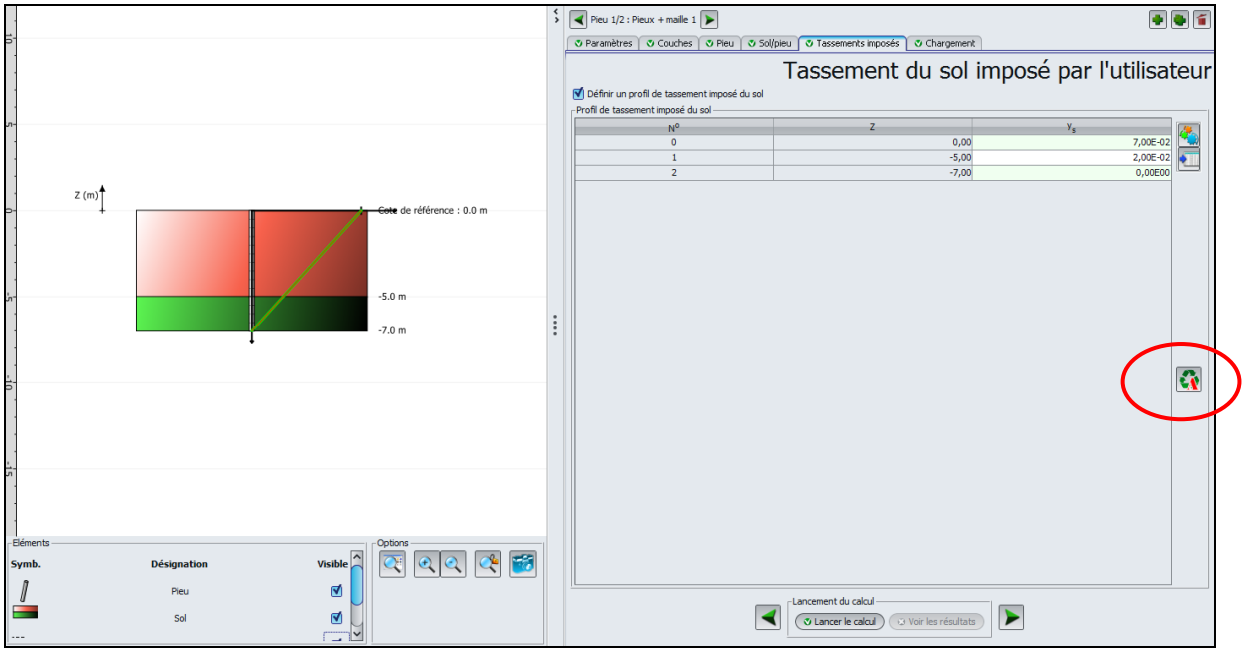


Figure F.24 Exemple de tassement du sol imposé par l'utilisateur

Ci-dessous un tableau récapitulatif des paramètres à compléter :

Désignation	**Unité**	**Valeur par défaut**	**Condition d'affichage**	**Valeur obligatoire**	**Contrôles locaux**
N°	-	-	Toujours	Oui	Complétées automatiquement
Z : cote du point de calcul	m	-	Toujours	Oui	
y_s : tassement imposé du sol à cette cote	m	-	Toujours	Oui	-

Tableau F.10 Récapitulatif des paramètres nécessaires à la définition du tassement imposé du sol

F.3.6.2 Assistant d'importation du tassement imposé du sol

Le module Taspie+ permet d'importer des profils de tassement imposé du sol issues d'un calcul Taspie+, Tasseldo ou Tasneg, en cliquant sur le bouton .

Cadre "Répertoire d'importation" :

Par défaut, lors de l'ouverture de l'assistant, Foxta tente de trouver un fichier à importer dans le répertoire où se trouve le projet courant. Si ce répertoire ne contient pas le fichier souhaité, cliquer sur le bouton Parcourir .

Onglet "Importer depuis Taspie+" :

Dans le cadre de gauche, sélectionner le fichier à importer.

A droite s'affichent :

- la date du calcul (pour mémoire) ;
- les couples (z ; y_s) : cotes/tassements à importer.

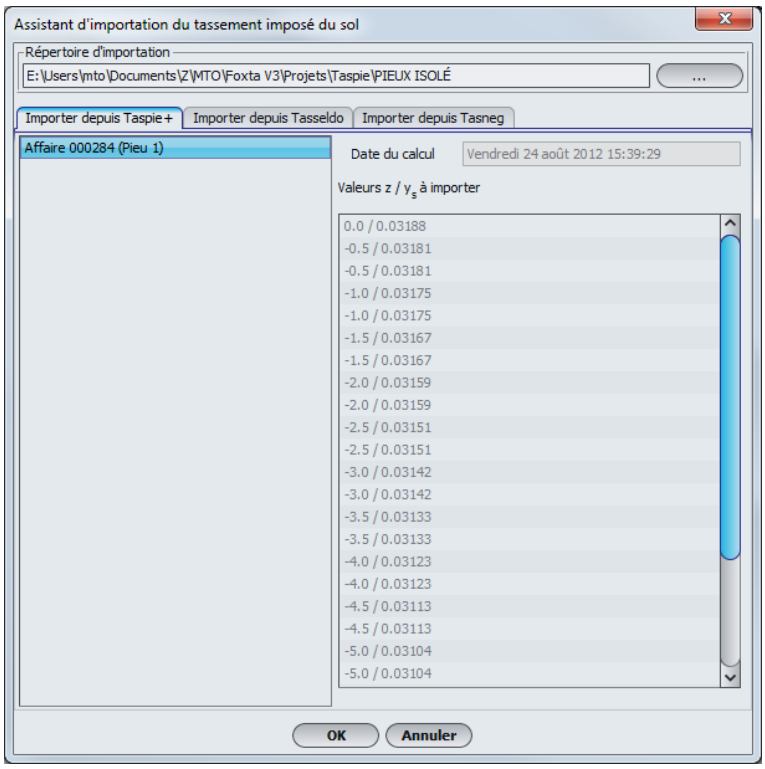


Figure F.25 Assistant d'importation du tassement du sol imposé depuis Taspie+

Onglet "importer depuis Tasseldo" :

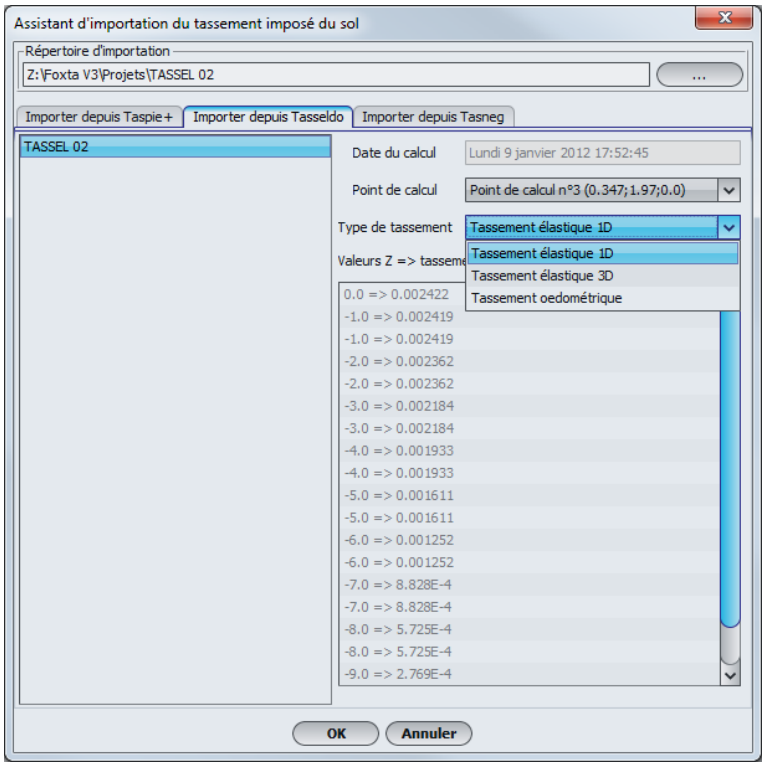


Figure F.26 Assistant d'importation du tassement du sol imposé depuis Tasseldo

Dans le cadre de gauche, sélectionner le fichier à importer.

A droite s'affichent :

- la date du calcul (pour mémoire) ;
- les points de calcul Tasseldo disponibles dans le fichier sélectionné : sélectionner dans la liste déroulante le point de calcul souhaité ;
- le type de tassement : sélectionner dans la liste déroulante les valeurs de tassement à importer : élastique 1D, élastique 3D ou œdométrique.
- les couples (Z ; y) : cotes/tassements à importer.

Onglet "Importation depuis Tasneg" :

Dans le cadre de gauche, sélectionner le fichier à importer.

A droite s'affichent :

- la date du calcul (pour mémoire) ;
- les couples (Z ; y) : cotes/tassements à importer.

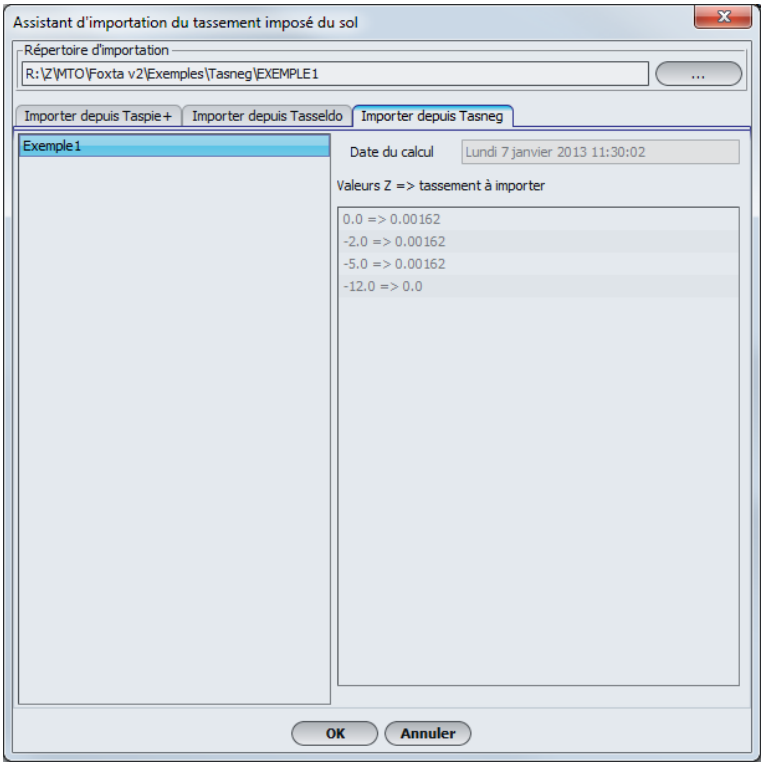


Figure F.27 Assistant d'importation du tassement du sol imposé depuis Tasneg

F.3.7. Onglet "Chargement"

F.3.7.1 Pour un calcul de type "Pieu isolé"

F.3.7.1.1 Définition de la charge en tête

- Saisir la charge appliquée en tête de pieu (kN), celle-ci est prise positive vers le bas (compression). Il est possible de définir une charge négative, ce qui correspond à un calcul d'un pieu travaillant en traction (en tête).

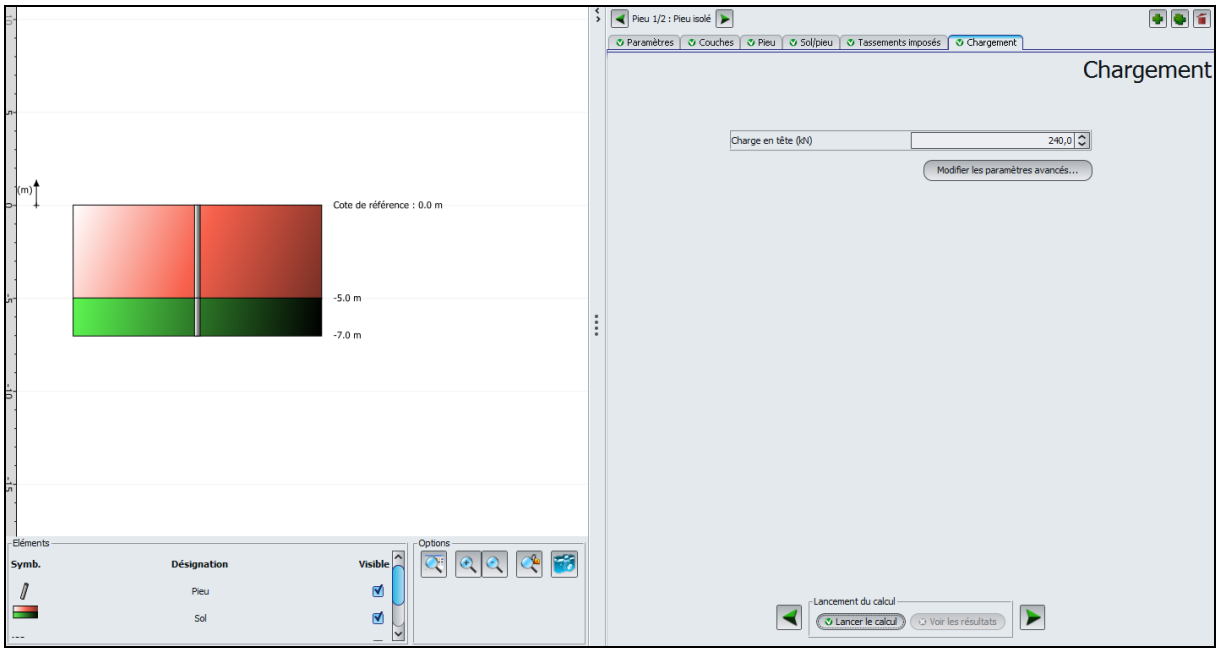


Figure F.28 Onglet "Chargement" pour un calcul de Pieu isolé

F.3.7.1.2 Paramètres avancés

Le bouton Modifier les paramètres avancés... permet de contrôler les paramètres suivants :

- tolérance : ce paramètre contrôle la précision relative du processus itératif gérant la non-linéarité des lois de mobilisation ;
- nombre de pas : ce paramètre contrôle le nombre de points constituant la courbe de chargement ;
- coefficient du frottement négatif : ce facteur de pondération, par défaut égal à 1,00, est appliqué sur les zones où le frottement est négatif (voir chapitre F.2.4.3).

Les valeurs proposées par défaut sont à conserver dans la plupart des cas (et un bouton permet de réinitialiser les paramètres avancés aux valeurs par défaut si nécessaire) :

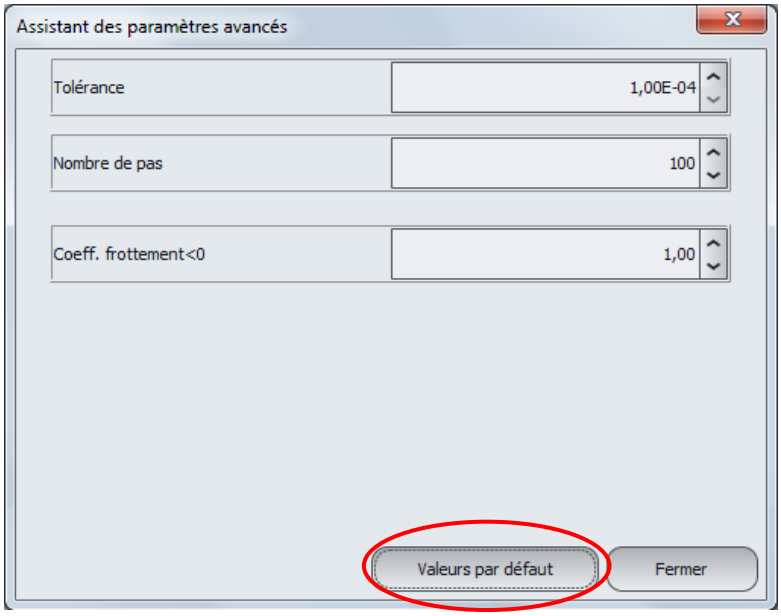


Figure F.29 Assistant des paramètres avancés pour un calcul "Pieu isolé"

Désignation des paramètres	**Unité**	**Valeur par défaut**	**Condition d'affichage**	**Valeur obligatoire**	**Contrôles locaux**
Tolérance (ou précision relative des calculs)	m	1,0E-04	Toujours	Oui	-
Nombre de pas	-	100	Toujours	Oui	$1 \leq x \leq 1000$
Coeff. frottement<0 : coefficient de pondération du frottement négatif (voir aussi le chapitre F.2.4.3)	-	1,0	Toujours	Oui	Coeff > 0

Tableau F.11 Paramètres avancés, cas d'un pieu isolé

F.3.7.2 Cas d'un calcul de "Pieu + maille de sol associée"

F.3.7.2.1 Cadre "Paramètres de la maille"

Les données à définir sont les suivantes :

Désignation des paramètres	**Unité**	**Valeur par défaut**	**Condition d'affichage**	**Valeur obligatoire**	**Contrôles locaux**
Dimension de la maille selon X	m	1,0	Toujours	Oui	> 0
Dimension de la maille selon Y	m	1,0	Toujours	Oui	> 0
Charge maille	kPa	0,0	Toujours	Oui	≥ 0

Tableau F.12 Paramètres de la maille (cas d'un calcul "pieu+maille associée")

*Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011***

F.3.7.2.2 Type de calcul : Dallage

Dans un calcul de type "Déformation imposée (type dallage)", le tassement est supposé uniforme au sommet de la maille (cas d'un dallage sur inclusions rigides par exemple). Taspie+ permet de déterminer dans ce cas la répartition des contraintes entre le pieu et le sol (voir aussi les chapitres F.2.2 et F.2.5.4).

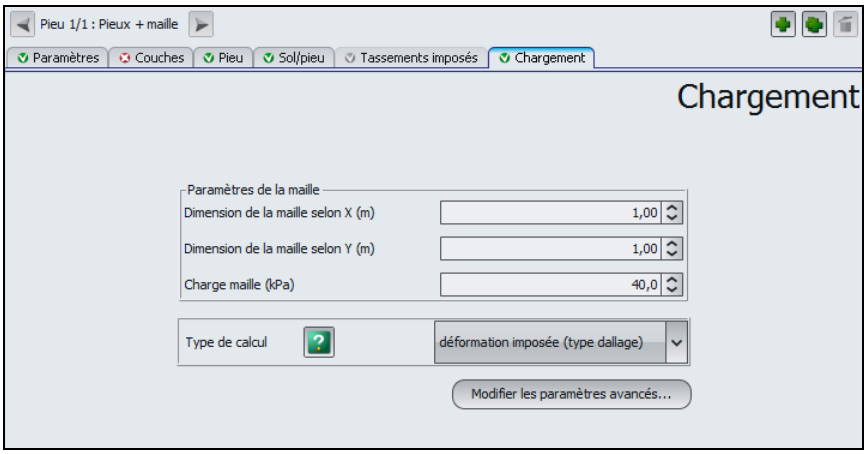


Figure F.30 Onglet "Chargement" d'un calcul de type pieu + maille de sol associée de type Dallage

Une figure d'aide est disponible pour expliciter le choix du type de calcul, en cliquant sur le bouton ? associé:

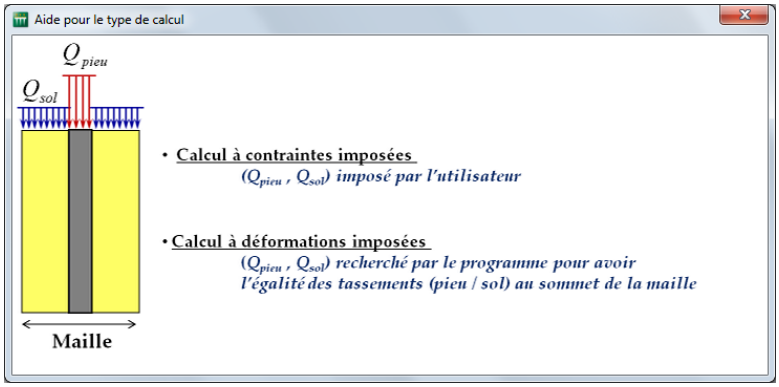

Aide pour le type de calcul
Q_{pieu}
Q_{sol}
Maille
• Calcul à contraintes imposées
(Q_{pieu} , Q_{sol}) imposé par l'utilisateur
• Calcul à déformations imposées
(Q_{pieu} , Q_{sol}) recherché par le programme pour avoir
l'égalité des tassements (pieu / sol) au sommet de la maille

Figure F.31 Figure d'aide – Choix du type de calcul Dallage/Remblai

F.3.7.2.3 Type de calcul : Remblai

Dans un calcul de type "Contrainte imposée (type remblai)", l'utilisateur impose la distribution des contraintes au sommet de la maille (voir aussi les chapitres F.2.2 et F.2.5.3).

Pour le calcul de type remblai, il est nécessaire de définir une donnée supplémentaire, à savoir le paramètre $e_Q$pieu :

- $e_Q$pieu : Fraction de la charge totale sur la maille appliquée en tête du pieu. Cette fraction est un nombre décimal compris entre 0 et 1 inclus.

  La valeur proposée par défaut est $e_Q$pieu = section du pieu / section de la maille, ce qui correspond à une condition de chargement uniforme au sommet de la maille.

  La valeur de $e_Q$pieu peut être modifiée afin de répondre à des situations particulières : choisir dans ce cas "Saisie manuelle". Par exemple :
  - $e_Q$pieu = 1 : indique que l'on va transmettre toute la charge appliquée au pieu ;
  - $e_Q$pieu = 0 traduit le fait que le pieu n'est pas chargé en tête. Toute la charge appliquée est reprise par le sol.

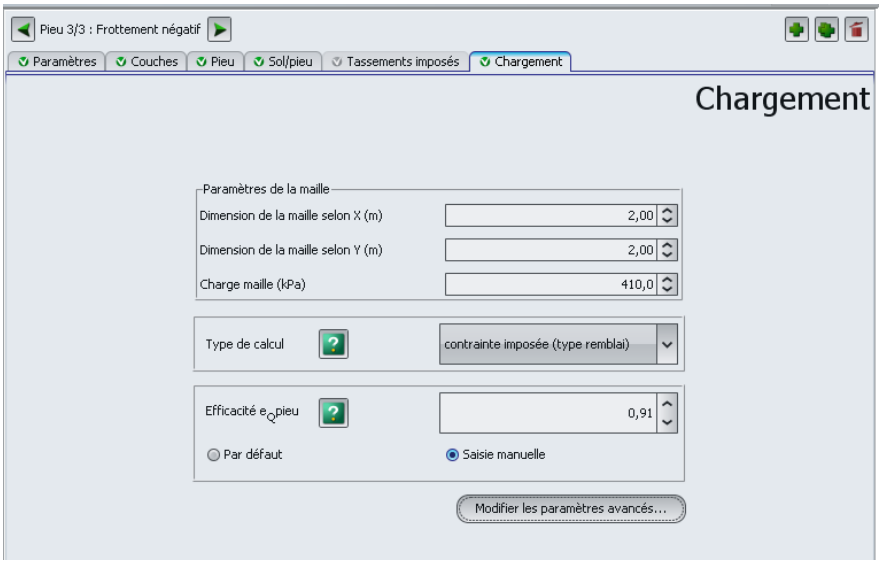


Figure F.32 Onglet "Chargement" d'un calcul Pieu + maille de sol associée de type Remblai

Une figure d'aide est disponible pour expliciter la signification du paramètre $e_Q$pieu, en cliquant sur le bouton [?] associé :

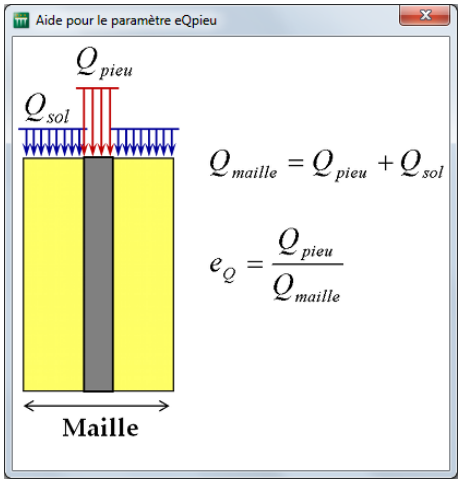


Figure F.33 Figure d'aide – Signification du paramètre $e_Q$pieu

F.3.7.2.4 Paramètres avancés

Les paramètres avancés sont accessibles en cliquant sur le bouton [Modifier les paramètres avancés...].

Ci-dessous un tableau récapitulatif des paramètres avancés pour un calcul "pieu + maille de sol associée" :

Désignation des paramètres	**Unité**	**Valeur par défaut**	**Condition d'affichage**	**Valeur obligatoire**	**Contrôles locaux**
Tolérance (ou critère de convergence)	m	1E-04	Toujours	Oui	-
Nombre de pas	-	100	Toujours	Oui	$1 \leq x \leq 1000$

Tableau F.13 Récapitulatif des paramètres avancés pour un calcul "pieu + maille de sol associée"

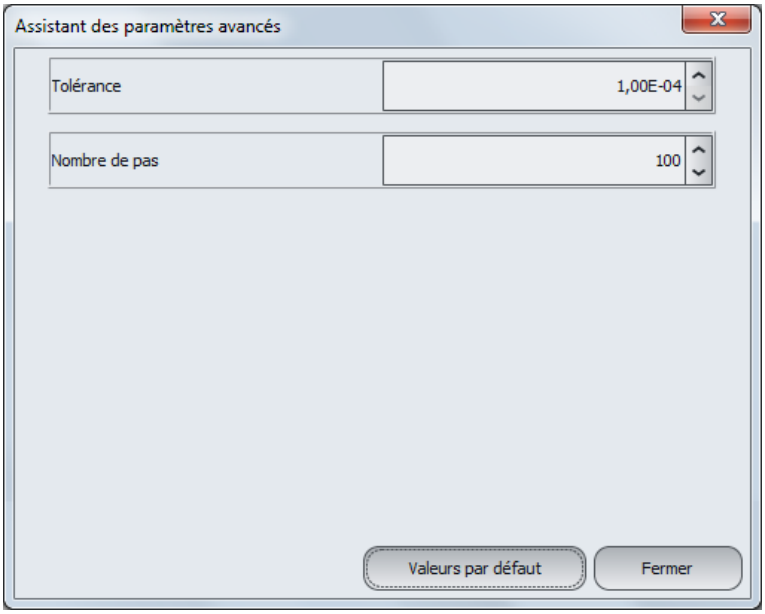


Figure F.34 Assistant Paramètres avancés pour un calcul "pieu + maille de sol associée"

F.3.8. Calcul standard / Calcul pas-à-pas

Comme indiqué au chapitre F.2.5.1, Taspie+ est doté de 2 moteurs de calcul complémentaires.

Le choix entre les 2 moteurs de calcul est effectué automatiquement par Taspie+ en fonction des données saisies.

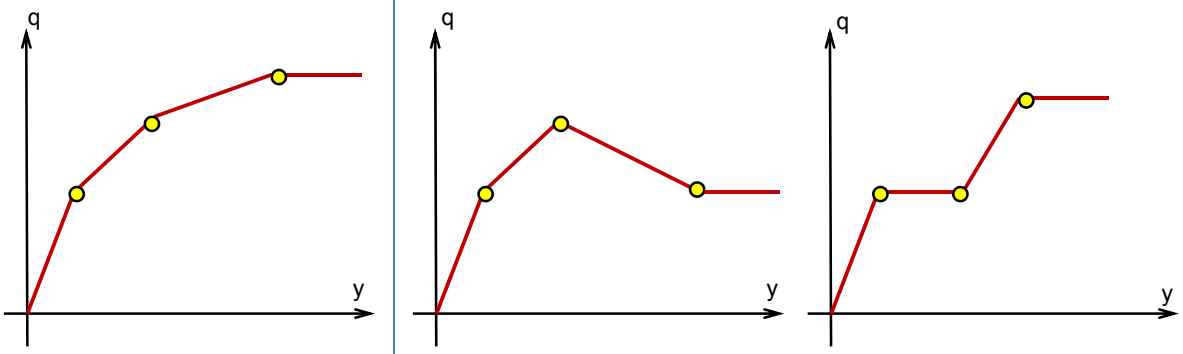
Dans la grande majorité des cas, c'est le moteur de calcul principal (résolution matricielle par éléments finis) qui est utilisé. Nous nous référerons ici à cette situation sous le terme de "cas standard".

Toutefois, dans les cas où la courbe de transfert comporte un ou plusieurs paliers décroissants, c'est le moteur de calcul secondaire qui est utilisé. Ce cas se présente dans le cas où l'utilisateur :

- choisit des lois de mobilisation entrées point par point ;
- et définit l'une au moins des lois de mobilisation (frottement latéral pour l'une des couches ou contrainte en pointe) comme étant non strictement croissante : par ex. un palier constant intermédiaire ou un palier décroissant comme le montre la figure ci-dessous.

Nous nous référerons ici à cette situation sous le terme de "calcul pas-à-pas". Lorsque Taspie+ identifie cette situation, certains paramètres supplémentaires sont requis (essentiellement dans les paramètres avancés de l'onglet "Chargement").

Les spécificités des paramètres d'un calcul "pas-à-pas" sont définies dans les sous-chapitres suivants.



Courbe de mobilisation croissante => résolution matricielle (cas standard)

Courbe de mobilisation non monotone=> résolution itérative « pas à pas » (moteur de calcul secondaire)

F.3.8.1 Onglet "Paramètres" - Type d'impression

Dans le cas des calculs pas-à-pas, le cadre "Paramètres généraux" comporte une donnée supplémentaire : le type d'impression.

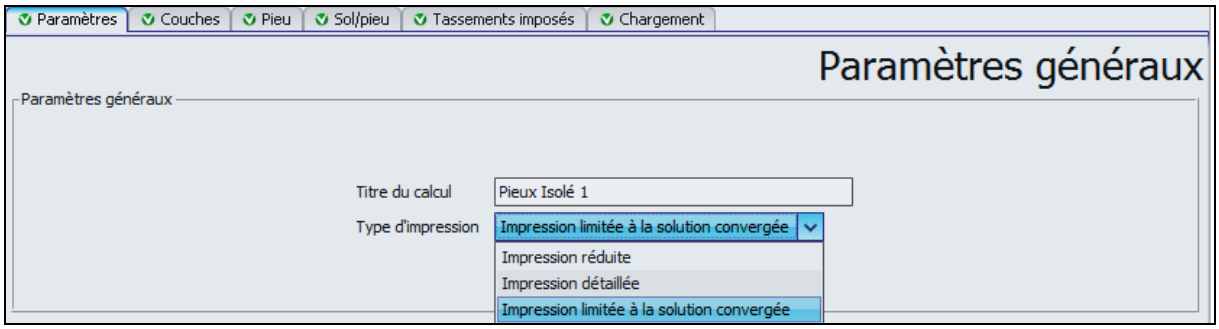


Figure F.35 Onglet "Paramètres" – Cas d'un calcul "pas-à-pas"

Les choix possibles pour le type d'impression sont illustrés sur la figure ci-dessus. Le choix proposé par défaut est celui d'une impression limitée à la solution convergée.

F.3.8.2 Onglet "Couches" - Limitations

Dans le cas d'un calcul pas-à-pas, les limitations suivantes sont à prendre en compte :

- le nombre total de couches doit être de 25 au maximum ;
- le nombre total de subdivisions le long du pieu doit être de 500 au maximum.

En revanche, dans le cas d'un calcul "standard", il n'y a aucune limite sur le nombre total de couches ou de subdivisions.

F.3.8.3 Onglet "Sol/pieu" - Limitations

Dans le cas d'un calcul pas-à-pas, la contrainte limite en pointe doit être strictement supérieure à zéro. Mettre une valeur numériquement faible (par exemple 0,1 kPa) dans les situations où l'on veut négliger le terme de pointe.

F.3.8.4 Onglet "Chargement"

Pour les calculs pas-à-pas, la fenêtre des paramètres avancés comporte des paramètres supplémentaires par rapport au cas standard décrit précédemment :

F.3.8.4.1 Cas du pieu isolé – Cas d'une charge de traction

Dans le cas d'un calcul pas-à-pas, le programme n'annule pas automatiquement le terme de pointe pour un pieu travaillant en traction. Dans ce cas, il convient à l'utilisateur d'entrer une contrainte limite en pointe numériquement très faible (par exemple 0,1 kPa).

F.3.8.4.2 Cas du pieu isolé – Paramètres avancés

Les paramètres avancés supplémentaires affichés sont ceux du cadre "Intervalle de calcul". Ils sont détaillés ci-dessous :

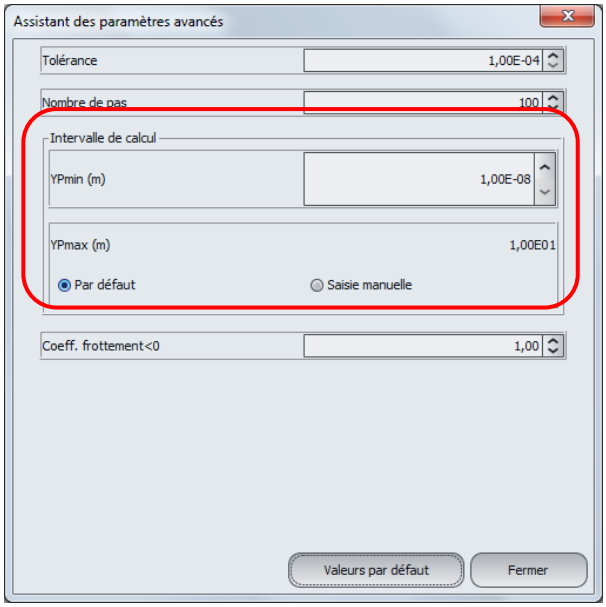


Figure F.36 Assistant des paramètres avancés – Calcul pas-à-pas (pieu isolé)

Désignation des paramètres	Unité	Valeur par défaut	Condition d'affichage	Valeur obligatoire	Contrôles locaux
YPmin : valeur minimale du déplacement en pied à examiner	m	1,0E-08	Toujours	Oui	>0
YPmax : valeur maximale du déplacement en pied à examiner	m	Dernière valeur de la courbe de mobilisation de la contrainte en pointe	Toujours	Oui	> YPmin

Tableau F.14 Paramètres de l'Assistant des paramètres avancés– Calcul pas-à-pas (pieu isolé)

F.3.8.4.3 Cas du calcul "pieu + maille associée" de type dallage – Paramètres avancés

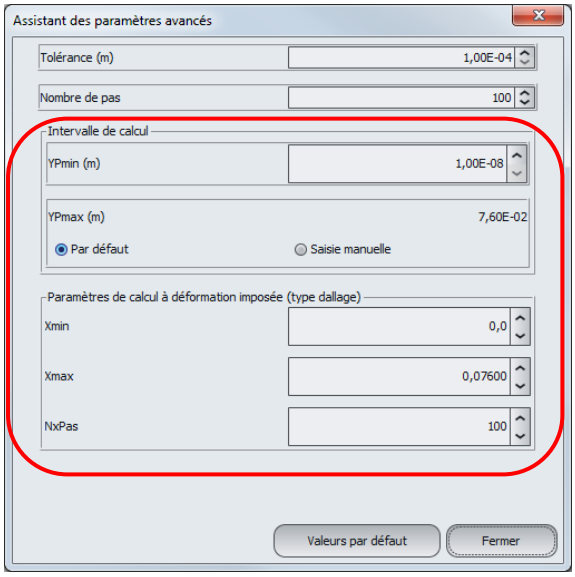


Figure F.37 Assistant des paramètres avancés – Calcul pas-à-pas (pieu+maille associée - type dallage)

Les paramètres supplémentaires du cadre "Intervalle de calcul" sont les mêmes que ceux décrits ci-dessus pour le pieu isolé (chapitre F.3.8.4.1).

Les paramètres supplémentaires du cadre "Paramètres de calcul à déformation imposée (type dallage)" sont les suivants :

Désignation des paramètres	**Unité**	**Valeur par défaut**	**Condition d'affichage**	**Valeur obligatoire**	**Contrôles locaux**
YPmin : valeur minimale du déplacement en pied à examiner	m	1,0E-08	Toujours	Oui	>0
YPmax : valeur maximale du déplacement en pied à examiner	m	Tassement calculé pour le sol sans le pieu sous contrainte q_{maille}	Toujours	Oui	> YPmin
Xmin : borne inférieure de l'intervalle de tassement du dallage à étudier	m	0	Toujours	Oui	-
Xmax : borne supérieure de l'intervalle de tassement du dallage à étudier	m	= YPmax	Toujours	Oui	> Xmin
Nxpas : nombre de pas de calcul	-	100	Toujours	Oui	$0 < Nxpas \leq 10^5$

Tableau F.15 Paramètres de l'Assistant des paramètres avancés– Calcul pas-à-pas (pieu + maille associée, type dallage)

F.3.8.4.4 Cas du calcul "pieu + maille associée" de type remblai – Paramètres avancés

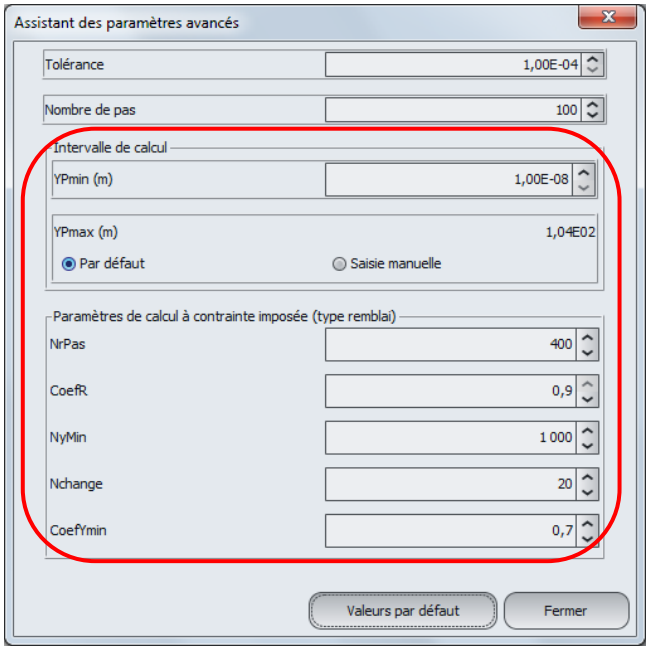


Figure F.38 Assistant des paramètres avancés – Calcul pas-à-pas (pieu+maille associée - type remblai)

Les paramètres supplémentaires du cadre "Intervalle de calcul" sont les mêmes que ceux décrits ci-dessus pour le pieu isolé (chapitre F.3.8.4.1).

Les paramètres supplémentaires du cadre "Paramètres de calcul à déformation imposée (type remblai) sont les suivants :

Désignation des paramètres	**Unité**	**Valeur par défaut**	**Condition d'affichage**	**Valeur obligatoire**	**Contrôles locaux**
YPmin : valeur minimale du déplacement en pied à examiner	m	1,0E-08	Toujours	Oui	>0
YPmax : valeur maximale du déplacement en pied à examiner	m	Tassement calculé pour le sol sans le pieu sous contrainte qmaille	Toujours	Oui	> YPmin
Nrpas : nombre maximal d'itérations pour calculer le tassement du cylindre de sol	-	400	Toujours	Oui	0 < Nrpas ≤ 1000
CoefR : coefficient de relaxation. Définit la convergence des profils successifs de tassement imposé autour du pieu (*)	-	0,9	Toujours	Oui	0 < CoefR < 1

Nymin : nombre de pas adopté pour les itérations 2 et suivantes pour balayer l'intervalle des déplacements en pied	-	1000	Toujours	Oui	$0 < Nymin \leq 10^5$
Nchange : numéro de l'itération à partir de laquelle l'intervalle de balayage est redéfini en fonction du choix de CoefYmin et le nombre de découpages devient Nymin	-	20	Toujours	Oui	$0 < Nchange \leq 1000$
CoefYmin	m	0,7	Toujours	Oui	$0 < CoefYmin < 1$

(*) Tass. imposé (n+1) = CoefR x tass. imposé (n) + (1-CoefR)*tass. calculé (n)

Tableau F.16 Paramètres de l'Assistant des paramètres avancés– Calcul pas-à-pas (pieu + maille associée, type remblai)

F.3.9. Calcul et Résultats

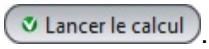
F.3.9.1 Calcul

Le calcul peut se lancer depuis n'importe quel onglet à partir du moment où les onglets sont correctement renseignés, c'est-à-dire lorsqu'ils sont tous marqués d'une coche verte (par exemple :

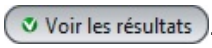
).

Les onglets sont marqués d'une croix rouge (par exemple :

) tant qu'ils ne sont pas complétés correctement (données manquantes ou non conformes aux valeurs attendues).

Pour lancer le calcul, cliquer sur le bouton 

.

Pour afficher les résultats du calcul, cliquer sur le bouton 

.

La fenêtre suivante s'affiche alors et propose les différents types de résultats accessibles après un calcul Taspie+ :

- 2 types de résultats numériques : résultats formatés et tableaux de résultats ;
- 3 types de résultats graphiques : la courbe de chargement, les résultats principaux et les résultats complémentaires.

  Nota : la courbe de chargement n'est accessible que pour les calculs de type "Pieu isolé".

IMPORTANT : les résultats sont donnés le long du pieu dans le repère **local** du pieu (en abscisse par rapport à la tête du pieu) et non en cotes.

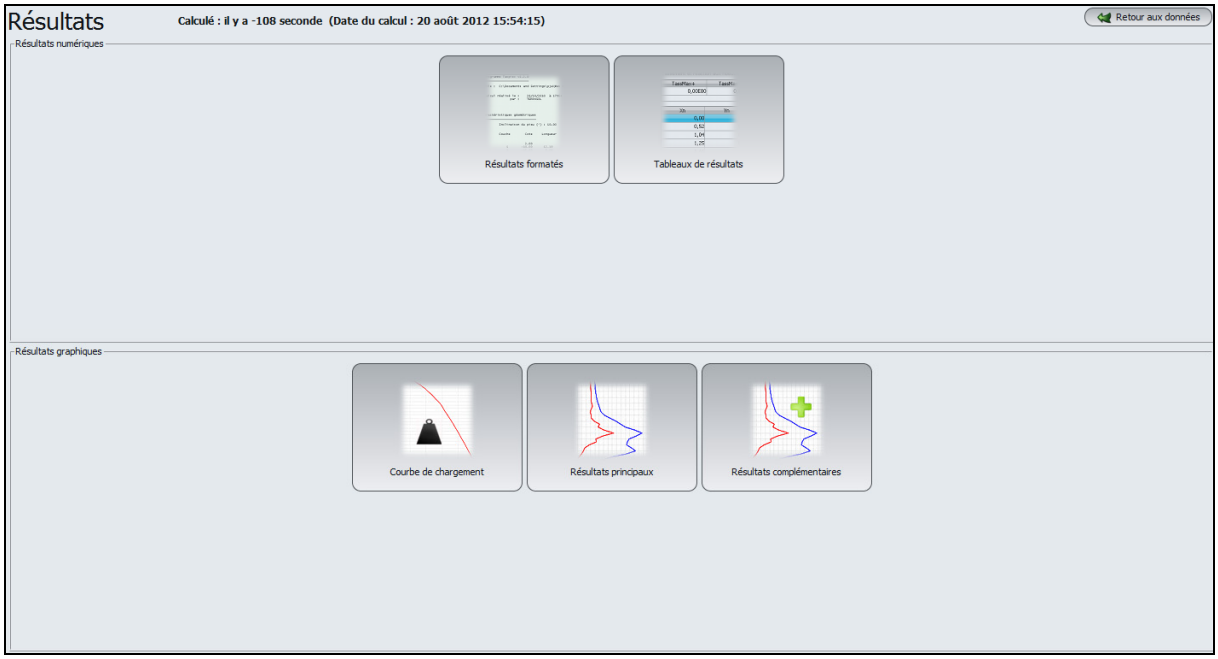


Figure F.39 Fenêtre Résultats

F.3.9.2 Résultats numériques

F.3.9.2.1 Résultats numériques formatés – Cas d'un calcul de type "Pieu isolé"

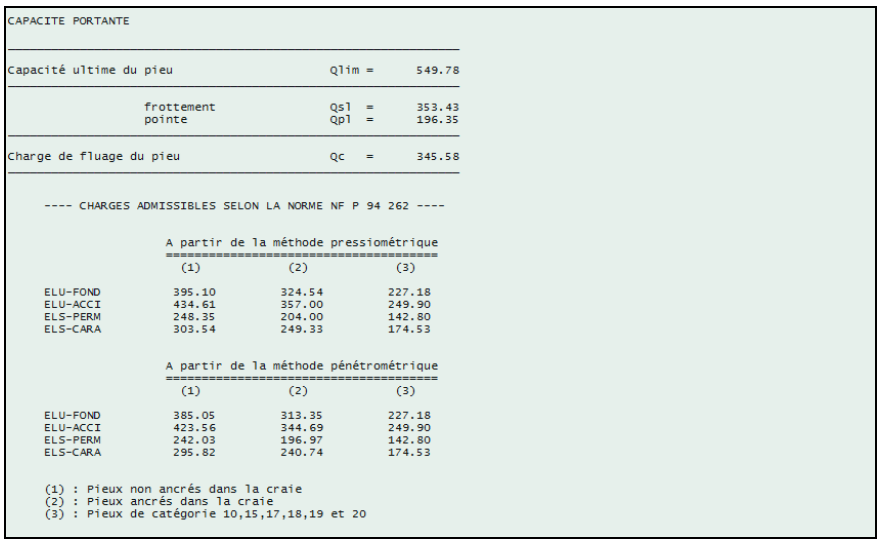
```
Programme Taspie+ v2.2.7                          (c) TERRASOL 2012

File :  R:\Logiciels\Foxta V3\Manuels et exemples\Manuels Foxta V3\F - Taspie+\exemples VBE\TASPIE+ EXEMPLE 1\Taspie+ exemple 1[TP]-1.bli

Calcul réalisé le :    11/09/2012  à 11h49
          par :    Terrasol

Titre du calcul : Pieu isolé sans tassement imposé



Caractéristiques géométriques

        Inclinaison du pieu (°) :  0.00

        Couche       Cote     Longueur    éléments    Diametre    Diametre    Section    Perimetre
                                                      (section)  (perimetre)

                     0.00
            1       -4.00        4.00          10       0.600       0.600      0.283        1.885
            2      -10.00        6.00          20       0.600       0.600      0.283        1.885
            3      -12.00        2.00          10       0.600       0.600      0.283        1.885
                                 12.00

        Mise en place sans refoulement


Caractéristiques mécaniques

        Couche       Cote     Longueur    éléments  Frottement    Module       Module     G ou G' iG
                                                      limite     du pieu      du sol
                     0.00
            1       -4.00        4.00          10       20.00   0.100E+08   0.100E+11      0.00   0
            2      -10.00        6.00          20       50.00   0.100E+08   0.100E+11      0.00   0
            3      -12.00        2.00          10      120.00   0.100E+08   0.100E+11      0.00   0
                                 12.00        qpl =    2500.00   S(Hi/Ei) =  0.000E+00

                                                                Tassement poids propre    0.0000
                                                                Tassement sans pieu       0.0000

                                                                Supplément poids colonne           0.00

Lois de mobilisation

    Couche  1                              cotes :     0.000 à     -4.000

        Em    =     5000.        qsl  =     20.00

        mobilisation frottement   y        qs                          *** Frank et Zhao (sol fin foré)

                                0.0006     10.00
                                0.0036     20.00

    Couche  2                              cotes :    -4.000 à    -10.000

        Em    =     8000.        qsl  =     50.00

        mobilisation frottement   y        qs                          *** Frank et Zhao (sol granulaire foré)
```

Figure F.40 Résultats numériques formatés (rappel des données)

Les résultats formatés contiennent :

- Un rappel des données (Figure F.40) : caractéristiques géométriques, caractéristiques des couches de sol, détail des lois de mobilisation.
- Les calculs de capacité portante (Figure F.41, voir aussi chapitre F.2.8), avec les valeurs réglementaires suivantes (selon la norme NF P 94 262) :
  - ✓ Valeurs limites des charges ultimes en frottement et en pointe (sans pondération) ;
  - ✓ Valeur limite de la charge critique du fluage (sans pondération) ;
  - ✓ Les charges admissibles à l'E.L.S (en combinaisons quasi-permanente et caractéristique) et à l'E.L.U (en combinaisons fondamentale et accidentelle).

  Ces calculs sont menés pour la totalité de la longueur du pieu (toutes les couches de sol sont prises en compte).



CAPACITE PORTANTE

Capacité ultime du pieu		Qlim =	549.78
	frottement	Qsl =	353.43
	pointe	Qpl =	196.35
Charge de fluage du pieu		Qc =	345.58

---- CHARGES ADMISSIBLES SELON LA NORME NF P 94 262 ----

A partir de la méthode pressiométrique

	(1)	(2)	(3)
ELU-FOND	395.10	324.54	227.18
ELU-ACCI	434.61	357.00	249.90
ELS-PERM	248.35	204.00	142.80
ELS-CARA	303.54	249.33	174.53

A partir de la méthode pénétrométrique

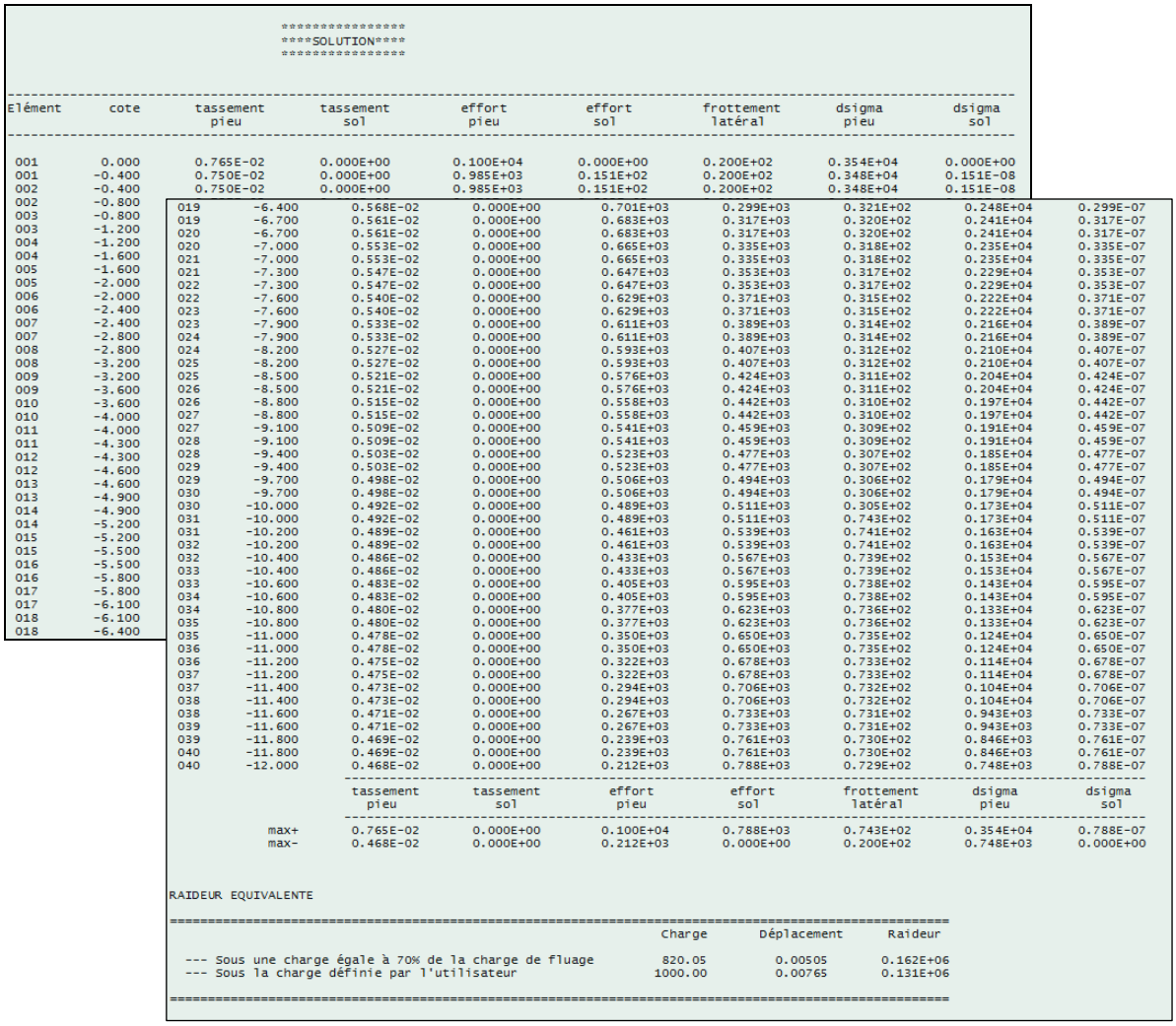
	(1)	(2)	(3)
ELU-FOND	385.05	313.35	227.18
ELU-ACCI	423.56	344.69	249.90
ELS-PERM	242.03	196.97	142.80
ELS-CARA	295.82	240.74	174.53

(1) : Pieux non ancrés dans la craie
(2) : Pieux ancrés dans la craie
(3) : Pieux de catégorie 10,15,17,18,19 et 20

Figure F.41 Résultats numériques formatés – Capacité portante

- Le tableau de résultats détaillés avec pour chaque cote de calcul (Figure F.42) :
  - ✓ Le tassement du pieu (m) ;
  - ✓ Le tassement du sol (m) ;
  - ✓ L'effort dans le pieu (kN) ;
  - ✓ Supplément d''effort repris par le sol (kN) (par rapport à l'état de contraintes initial) ;
  - ✓ Le frottement latéral mobilisé (kPa) ;
  - ✓ $\Delta\sigma_{pieu}$ (kPa) : contrainte dans le pieu (effort/section) ;
  - ✓ $\Delta\sigma_{sol}$ (kPa) : supplément de contrainte dans le sol par rapport à la contrainte verticale initiale.

  Taspie+ affiche également en bas du tableau, la valeur maximale (max+) et minimale (max-) pour chaque colonne.



****SOLUTION****

Elément	cote	tassement pieu	tassement sol	effort pieu	effort sol	frottement latéral	dsigma pieu	dsigma sol
001	0.000	0.765E-02	0.000E+00	0.100E+04	0.000E+00	0.200E+02	0.354E+04	0.000E+00
001	-0.400	0.750E-02	0.000E+00	0.985E+03	0.151E+02	0.200E+02	0.348E+04	0.151E-08
002	-0.400	0.750E-02	0.000E+00	0.985E+03	0.151E+02	0.200E+02	0.348E+04	0.151E-08
002	-0.800							
003	-0.800							
003	-1.200							
004	-1.200							
004	-1.600							
005	-1.600							
005	-2.000							
006	-2.000							
006	-2.400							
007	-2.400							
007	-2.800							
008	-2.800							
008	-3.200							
009	-3.200							
009	-3.600							
010	-3.600							
010	-4.000							
011	-4.000							
011	-4.300							
012	-4.300							
012	-4.600							
013	-4.600							
013	-4.900							
014	-4.900							
014	-5.200							
015	-5.200							
015	-5.500							
016	-5.500							
016	-5.800							
017	-5.800							
017	-6.100							
018	-6.100							
018	-6.400							
019	-6.400	0.568E-02	0.000E+00	0.701E+03	0.299E+03	0.321E+02	0.248E+04	0.299E-07
019	-6.700	0.561E-02	0.000E+00	0.683E+03	0.317E+03	0.320E+02	0.241E+04	0.317E-07
020	-6.700	0.561E-02	0.000E+00	0.683E+03	0.317E+03	0.320E+02	0.241E+04	0.317E-07
020	-7.000	0.553E-02	0.000E+00	0.665E+03	0.335E+03	0.318E+02	0.235E+04	0.335E-07
021	-7.000	0.553E-02	0.000E+00	0.665E+03	0.335E+03	0.318E+02	0.235E+04	0.335E-07
021	-7.300	0.547E-02	0.000E+00	0.647E+03	0.353E+03	0.317E+02	0.229E+04	0.353E-07
022	-7.300	0.547E-02	0.000E+00	0.647E+03	0.353E+03	0.317E+02	0.229E+04	0.353E-07
022	-7.600	0.540E-02	0.000E+00	0.629E+03	0.371E+03	0.315E+02	0.222E+04	0.371E-07
023	-7.600	0.540E-02	0.000E+00	0.629E+03	0.371E+03	0.315E+02	0.222E+04	0.371E-07
023	-7.900	0.533E-02	0.000E+00	0.611E+03	0.389E+03	0.314E+02	0.216E+04	0.389E-07
024	-7.900	0.533E-02	0.000E+00	0.611E+03	0.389E+03	0.314E+02	0.216E+04	0.389E-07
024	-8.200	0.527E-02	0.000E+00	0.593E+03	0.407E+03	0.312E+02	0.210E+04	0.407E-07
025	-8.200	0.527E-02	0.000E+00	0.593E+03	0.407E+03	0.312E+02	0.210E+04	0.407E-07
025	-8.500	0.521E-02	0.000E+00	0.576E+03	0.424E+03	0.311E+02	0.204E+04	0.424E-07
026	-8.500	0.521E-02	0.000E+00	0.576E+03	0.424E+03	0.311E+02	0.204E+04	0.424E-07
026	-8.800	0.515E-02	0.000E+00	0.558E+03	0.442E+03	0.310E+02	0.197E+04	0.442E-07
027	-8.800	0.515E-02	0.000E+00	0.558E+03	0.442E+03	0.310E+02	0.197E+04	0.442E-07
027	-9.100	0.509E-02	0.000E+00	0.541E+03	0.459E+03	0.309E+02	0.191E+04	0.459E-07
028	-9.100	0.509E-02	0.000E+00	0.541E+03	0.459E+03	0.309E+02	0.191E+04	0.459E-07
028	-9.400	0.503E-02	0.000E+00	0.523E+03	0.477E+03	0.307E+02	0.185E+04	0.477E-07
029	-9.400	0.503E-02	0.000E+00	0.523E+03	0.477E+03	0.307E+02	0.185E+04	0.477E-07
029	-9.700	0.498E-02	0.000E+00	0.506E+03	0.494E+03	0.306E+02	0.179E+04	0.494E-07
030	-9.700	0.498E-02	0.000E+00	0.506E+03	0.494E+03	0.306E+02	0.179E+04	0.494E-07
030	-10.000	0.492E-02	0.000E+00	0.489E+03	0.511E+03	0.305E+02	0.173E+04	0.511E-07
031	-10.000	0.492E-02	0.000E+00	0.489E+03	0.511E+03	0.743E+02	0.173E+04	0.511E-07
031	-10.200	0.489E-02	0.000E+00	0.461E+03	0.539E+03	0.741E+02	0.163E+04	0.539E-07
032	-10.200	0.489E-02	0.000E+00	0.461E+03	0.539E+03	0.741E+02	0.163E+04	0.539E-07
032	-10.400	0.486E-02	0.000E+00	0.433E+03	0.567E+03	0.739E+02	0.153E+04	0.567E-07
033	-10.400	0.486E-02	0.000E+00	0.433E+03	0.567E+03	0.739E+02	0.153E+04	0.567E-07
033	-10.600	0.483E-02	0.000E+00	0.405E+03	0.595E+03	0.738E+02	0.143E+04	0.595E-07
034	-10.600	0.483E-02	0.000E+00	0.405E+03	0.595E+03	0.738E+02	0.143E+04	0.595E-07
034	-10.800	0.480E-02	0.000E+00	0.377E+03	0.623E+03	0.736E+02	0.133E+04	0.623E-07
035	-10.800	0.480E-02	0.000E+00	0.377E+03	0.623E+03	0.736E+02	0.133E+04	0.623E-07
035	-11.000	0.478E-02	0.000E+00	0.350E+03	0.650E+03	0.735E+02	0.124E+04	0.650E-07
036	-11.000	0.478E-02	0.000E+00	0.350E+03	0.650E+03	0.735E+02	0.124E+04	0.650E-07
036	-11.200	0.475E-02	0.000E+00	0.322E+03	0.678E+03	0.733E+02	0.114E+04	0.678E-07
037	-11.200	0.475E-02	0.000E+00	0.322E+03	0.678E+03	0.733E+02	0.114E+04	0.678E-07
037	-11.400	0.473E-02	0.000E+00	0.294E+03	0.706E+03	0.732E+02	0.104E+04	0.706E-07
038	-11.400	0.473E-02	0.000E+00	0.294E+03	0.706E+03	0.732E+02	0.104E+04	0.706E-07
038	-11.600	0.471E-02	0.000E+00	0.267E+03	0.733E+03	0.731E+02	0.943E+03	0.733E-07
039	-11.600	0.471E-02	0.000E+00	0.267E+03	0.733E+03	0.731E+02	0.943E+03	0.733E-07
039	-11.800	0.469E-02	0.000E+00	0.239E+03	0.761E+03	0.730E+02	0.846E+03	0.761E-07
040	-11.800	0.469E-02	0.000E+00	0.239E+03	0.761E+03	0.730E+02	0.846E+03	0.761E-07
040	-12.000	0.468E-02	0.000E+00	0.212E+03	0.788E+03	0.729E+02	0.748E+03	0.788E-07

	tassement pieu	tassement sol	effort pieu	effort sol	frottement latéral	dsigma pieu	dsigma sol
max+	0.765E-02	0.000E+00	0.100E+04	0.788E+03	0.743E+02	0.354E+04	0.788E-07
max-	0.468E-02	0.000E+00	0.212E+03	0.000E+00	0.200E+02	0.748E+03	0.000E+00

RAIDEUR EQUIVALENTE

	Charge	Déplacement	Raideur
--- Sous une charge égale à 70% de la charge de fluage	820.05	0.00505	0.162E+06
--- Sous la charge définie par l'utilisateur	1000.00	0.00765	0.131E+06

Figure F.42 Résultats numériques formatés détaillés et raideurs équivalentes pour un calcul de pieu isolé

- Les raideurs équivalentes (Figure F.42, voir aussi chapitre F.2.9) : pour la charge de service appliquée en tête ainsi que pour une charge égale à 70% de la charge limite de fluage, Taspie+ fournit :
  - ✓ Un rappel de la charge prise en compte (kN) ;
  - ✓ Le déplacement en tête du pieu calculé sous cette charge (m) ;
  - ✓ La raideur équivalente en tête de pieu (kN/m) : il s'agit du rapport de la charge en tête du pieu au déplacement correspondant.
- La raideur pour la charge égale à 70% de la charge limite de fluage est utilisée par défaut comme paramètre d'entrée à un calcul de groupe de pieux dans le module GROUPIE.

F.3.9.2.2 Résultats numériques formatés – Cas d'un calcul "Pieu + maille associée" – Calcul de type Dallage

Les résultats formatés incluent les mêmes informations que pour le pieu isolé (voir chapitre F.3.9.2.1), sauf :

- Une section complémentaire concernant la géométrie de la maille élémentaire et la charge appliquée sur la maille (Figure F.43), ainsi qu'un rappel du type de calcul (calcul à déformations imposées dans le cas d'un calcul type dallage), et la valeur de EQpieu trouvée (part de la charge totale appliquée au pieu).

  En effet, dans le cas d'un calcul de type dallage, la valeur EQpieu est un résultat du calcul (et non une donnée comme dans le cas d'un calcul de type remblai).

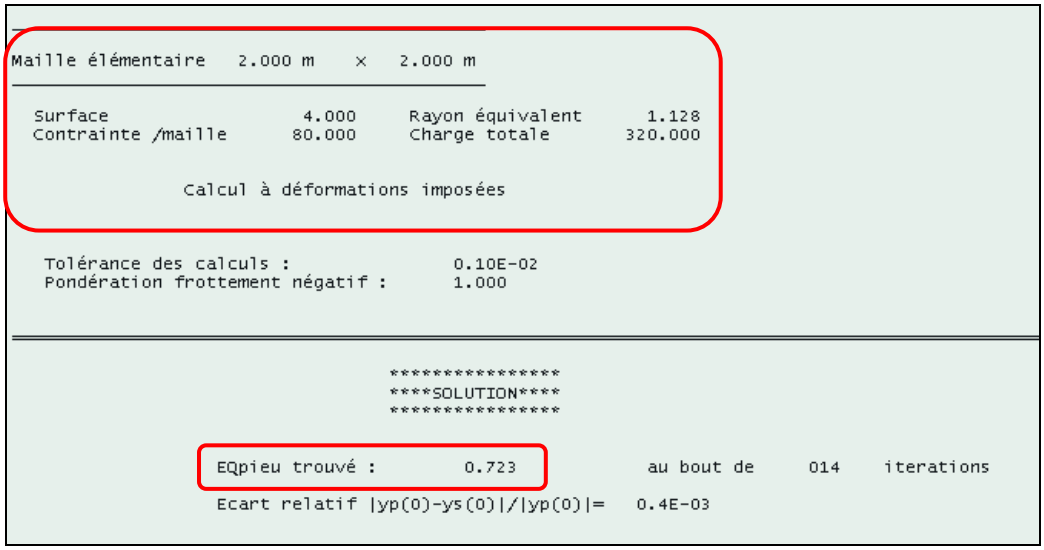

Maille élémentaire 2.000 m x 2.000 m
Surface 4.000 Rayon équivalent 1.128
Contrainte /maille 80.000 Charge totale 320.000
Calcul à déformations imposées
Tolérance des calculs : 0.10E-02
Pondération frottement négatif : 1.000
****SOLUTION****
EQpieu trouvé : 0.723 au bout de 014 iterations
Ecart relatif |yp(0)-ys(0)|/|yp(0)|= 0.4E-03

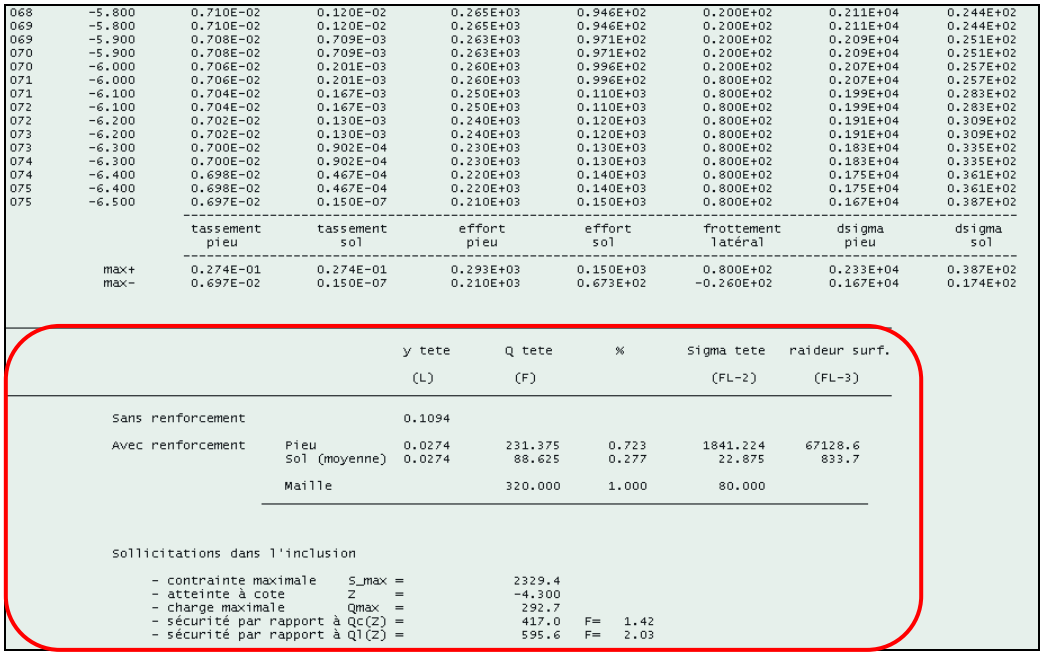
Figure F.43 Résultats numériques formatés – Pieu+maille associée, type dallage (informations relatives à la maille)

- En fin de fichier, la section "Raideurs équivalentes" a été remplacée par la section illustrée sur la Figure F.44. On y trouve :
  - ✓ Le tassement du sol non renforcé ;
  - ✓ Pour le pieu : le tassement en tête (m), la charge en tête (en kN et en proportion par rapport à la charge totale, on retrouve d'ailleurs pour la proportion la valeur de EQpieu), la contrainte correspondante en tête et la raideur surfacique correspondante (kPa/m, voir chapitre F.2.9) ;
  - ✓ Pour le sol : le tassement moyen en surface (m), la charge reprise par le sol (en kN et en proportion par rapport à la charge totale), la contrainte moyenne correspondante en surface et la raideur surfacique correspondante (kPa/m, voir chapitre F.2.9) ;
  - ✓ Un résumé des sollicitations dans le pieu (ou l'inclusion) :
    - la contrainte maximale S_max (kPa) atteinte dans l'inclusion ;
    - la cote z(m) à laquelle S_max est atteinte (point critique) ;
    - la charge maximale Qmax (kN) atteinte dans l'inclusion ;
    - la sécurité par rapport à la charge de fluage $Q_c(z)$: valeur $Q_c(z)$ (kN) et coefficient de sécurité $F = Q_c(z) / Qmax$;
    - la sécurité par rapport à la charge de rupture $Q_l(z)$: valeur $Q_l(z)$ (kN) et coefficient de sécurité $F = Q_l(z) / Qmax$.

      Les valeurs de Qc(z) et Ql(z) sont calculées en dessous du point critique.

Les raideurs surfaciques équivalentes sont estimées pour la charge Q(0) définie par l'utilisateur. La raideur surfacique au droit du pieu est obtenue en divisant la contrainte en tête du domaine pieu par le déplacement en tête du domaine pieu et la raideur surfacique au droit du domaine sol en divisant la contrainte verticale moyenne appliquée en tête du domaine sol par le tassement moyen à ce niveau.

Les recommandations ASIRI explicitent comment exploiter les raideurs surfaciques ainsi obtenues pour établir une distribution simplifiée équivalente de raideurs, autour de chaque inclusion et entre les inclusions, apte à conduire à une estimation représentative des moments dans le dallage Cette distribution équivalente de raideurs surfaciques peut être utilisée dans un modèle Tasplaq du dallage pour établir les sollicitations qu'il subit sous le chargement appliqué.



068	-5.800	0.710E-02	0.120E-02	0.265E+03	0.946E+02	0.200E+02	0.211E+04	0.244E+02
069	-5.800	0.710E-02	0.120E-02	0.265E+03	0.946E+02	0.200E+02	0.211E+04	0.244E+02
069	-5.900	0.708E-02	0.709E-03	0.263E+03	0.971E+02	0.200E+02	0.209E+04	0.251E+02
070	-5.900	0.708E-02	0.709E-03	0.263E+03	0.971E+02	0.200E+02	0.209E+04	0.251E+02
070	-6.000	0.706E-02	0.201E-03	0.260E+03	0.996E+02	0.200E+02	0.207E+04	0.257E+02
071	-6.000	0.706E-02	0.201E-03	0.260E+03	0.996E+02	0.800E+02	0.207E+04	0.257E+02
071	-6.100	0.704E-02	0.167E-03	0.250E+03	0.110E+03	0.800E+02	0.199E+04	0.283E+02
072	-6.100	0.704E-02	0.167E-03	0.250E+03	0.110E+03	0.800E+02	0.199E+04	0.283E+02
072	-6.200	0.702E-02	0.130E-03	0.240E+03	0.120E+03	0.800E+02	0.191E+04	0.309E+02
073	-6.200	0.702E-02	0.130E-03	0.240E+03	0.120E+03	0.800E+02	0.191E+04	0.309E+02
073	-6.300	0.700E-02	0.902E-04	0.230E+03	0.130E+03	0.800E+02	0.183E+04	0.335E+02
074	-6.300	0.700E-02	0.902E-04	0.230E+03	0.130E+03	0.800E+02	0.183E+04	0.335E+02
074	-6.400	0.698E-02	0.467E-04	0.220E+03	0.140E+03	0.800E+02	0.175E+04	0.361E+02
075	-6.400	0.698E-02	0.467E-04	0.220E+03	0.140E+03	0.800E+02	0.175E+04	0.361E+02
075	-6.500	0.697E-02	0.150E-07	0.210E+03	0.150E+03	0.800E+02	0.167E+04	0.387E+02

	tassement pieu	tassement sol	effort pieu	effort sol	frottement latéral	dsigma pieu	dsigma sol
max+	0.274E-01	0.274E-01	0.293E+03	0.150E+03	0.800E+02	0.233E+04	0.387E+02
max-	0.697E-02	0.150E-07	0.210E+03	0.673E+02	-0.260E+02	0.167E+04	0.174E+02

		y tete (L)	Q tete (F)	%	Sigma tete (FL-2)	raideur surf. (FL-3)
Sans renforcement		0.1094				
Avec renforcement	Pieu	0.0274	231.375	0.723	1841.224	67128.6
	Sol (moyenne)	0.0274	88.625	0.277	22.875	833.7
	Maille		320.000	1.000	80.000	

Sollicitations dans l'inclusion

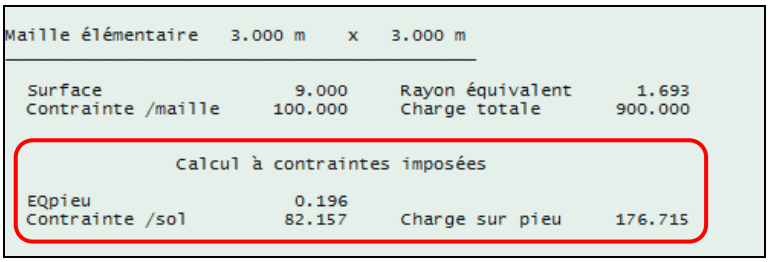
- contrainte maximale	S_max =	2329.4	
- atteinte à cote	Z =	-4.300	
- charge maximale	Qmax =	292.7	
- sécurité par rapport à Qc(Z)	=	417.0	F= 1.42
- sécurité par rapport à Ql(Z)	=	595.6	F= 2.03

Figure F.44 Résultats numériques formatés (solution) pour un calcul d'un pieu + maille de type Dallage

F.3.9.2.3 Résultats numériques formatés – Cas d'un calcul "Pieu + maille associée" – Calcul de type Remblai

Les résultats formatés affichés pour un calcul de type remblai sont quasiment identiques à ceux d'un calcul de type dallage (voir chapitre F.3.9.2.2), sauf pour la section concernant la maille et le type de calcul.

En effet, dans le cas d'un calcul de type remblai, on trouve l'indication "calcul à contraintes imposées" ainsi que le rappel de la valeur de EQpieu (imposée par l'utilisateur) et la répartition de charges correspondante : contrainte moyenne appliquée sur le sol (kPa) et charge appliquée en tête du pieu (kN).



Maille élémentaire 3.000 m x 3.000 m

Surface	9.000	Rayon équivalent	1.693
Contrainte /maille	100.000	Charge totale	900.000

Calcul à contraintes imposées

EQpieu	0.196		
Contrainte /sol	82.157	Charge sur pieu	176.715

Figure F.45 Résultats numériques formatés – Pieu+maille associée, type remblai (informations relatives à la maille)

F.3.9.2.4 Résultats numériques – Tableau de résultats

Le contenu du tableau de résultats est identique pour les 3 types de calcul (pieu isolé, pieu+maille associée/type dallage et pieu+maille associée/type remblai).

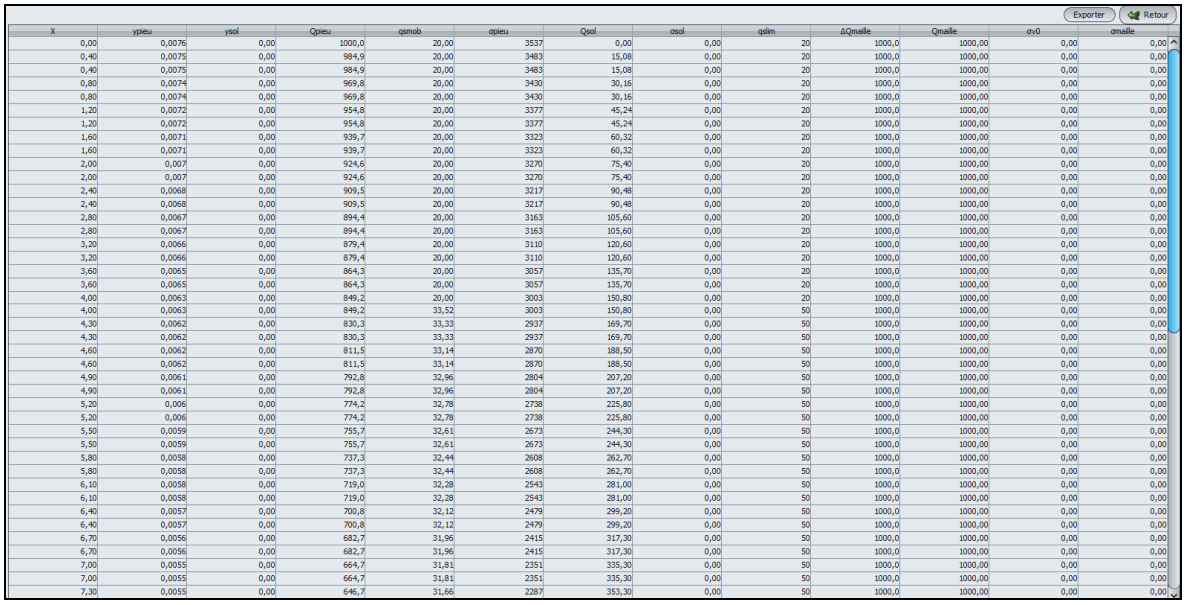
Nota : passer la souris sur l'entête de colonne afin d'obtenir dans une info-bulle la signification et l'unité de chaque terme.

On retrouve dans les premières colonnes du tableau les mêmes résultats que ceux détaillés pour les résultats formatés au chapitre F.3.9.2.1 (partie du tableau des résultats détaillés), mais on y trouve également des informations complémentaires pour chaque cote de calcul :

- qs_{lim} (kPa) : frottement unitaire limite à l'interface sol/pieu ;
- ΔQ_{maille} (kN) : total apporté dans la maille (supplément par rapport à l'état de contrainte initiale) ;
- Q_{maille} (kN) : effort total dans la maille (pieu + sol) ;
- σ_{v0} (kPa) : contrainte verticale initiale ;

- σ_{maille} (kPa) : contrainte moyenne dans la maille (= Q_{maille} / section de la maille).

A l'inverse, cet affichage n'inclut pas la partie de rappel des données, ni certains résultats (portance et raideurs équivalentes en particulier).



X	ypieu	ysol	Qpieu	qsmob	qpieu	Qsol	qsol	qslim	ΔQmaille	Qmaille	σv0	σmaille
0,00	0,0076	0,00	1000,0	20,00	3537	0,00	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
0,40	0,0075	0,00	984,9	20,00	3483	15,08	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
0,40	0,0075	0,00	984,9	20,00	3483	15,08	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
0,80	0,0074	0,00	969,8	20,00	3430	30,16	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
0,80	0,0074	0,00	969,8	20,00	3430	30,16	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
1,20	0,0072	0,00	954,8	20,00	3377	45,24	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
1,20	0,0072	0,00	954,8	20,00	3377	45,24	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
1,60	0,0071	0,00	939,7	20,00	3323	60,32	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
1,60	0,0071	0,00	939,7	20,00	3323	60,32	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,00	0,007	0,00	924,6	20,00	3270	75,40	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,00	0,007	0,00	924,6	20,00	3270	75,40	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,40	0,0068	0,00	909,5	20,00	3217	90,48	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,40	0,0068	0,00	909,5	20,00	3217	90,48	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,80	0,0067	0,00	894,4	20,00	3163	105,60	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,80	0,0067	0,00	894,4	20,00	3163	105,60	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
3,20	0,0066	0,00	879,4	20,00	3110	120,60	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
3,20	0,0066	0,00	879,4	20,00	3110	120,60	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
3,60	0,0065	0,00	864,3	20,00	3057	135,70	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
3,60	0,0065	0,00	864,3	20,00	3057	135,70	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,00	0,0063	0,00	849,2	20,00	3003	150,80	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,00	0,0063	0,00	849,2	33,52	3003	150,80	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,30	0,0062	0,00	830,3	33,33	2937	169,70	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,30	0,0062	0,00	830,3	33,33	2937	169,70	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,60	0,0062	0,00	811,5	33,14	2870	188,50	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,60	0,0062	0,00	811,5	33,14	2870	188,50	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,90	0,0061	0,00	792,8	32,96	2804	207,20	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,90	0,0061	0,00	792,8	32,96	2804	207,20	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,20	0,006	0,00	774,2	32,78	2738	225,80	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,20	0,006	0,00	774,2	32,78	2738	225,80	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,50	0,0059	0,00	755,7	32,61	2673	244,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,50	0,0059	0,00	755,7	32,61	2673	244,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,80	0,0058	0,00	737,3	32,44	2608	262,70	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,80	0,0058	0,00	737,3	32,44	2608	262,70	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,10	0,0058	0,00	719,0	32,28	2543	281,00	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,10	0,0058	0,00	719,0	32,28	2543	281,00	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,40	0,0057	0,00	700,8	32,12	2479	299,20	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,40	0,0057	0,00	700,8	32,12	2479	299,20	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,70	0,0056	0,00	682,7	31,96	2415	317,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,70	0,0056	0,00	682,7	31,96	2415	317,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
7,00	0,0055	0,00	664,7	31,81	2351	335,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
7,00	0,0055	0,00	664,7	31,81	2351	335,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
7,30	0,0055	0,00	646,7	31,66	2287	353,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00

Figure F.46 Résultats numériques – Tableau de résultats

F.3.9.3 Résultats graphiques

F.3.9.3.1 Courbe de chargement

La courbe de chargement n'est accessible que dans le cas d'un calcul de pieu isolé.

Elle représente le tassement du pieu en tête (m) en fonction de la charge appliquée en tête de pieu (kN).

Elle est construite automatiquement par Taspie+ : le premier point correspond à une charge nulle appliquée en tête du pieu. Le dernier point correspond à l'application de 95 % de la charge à la rupture.

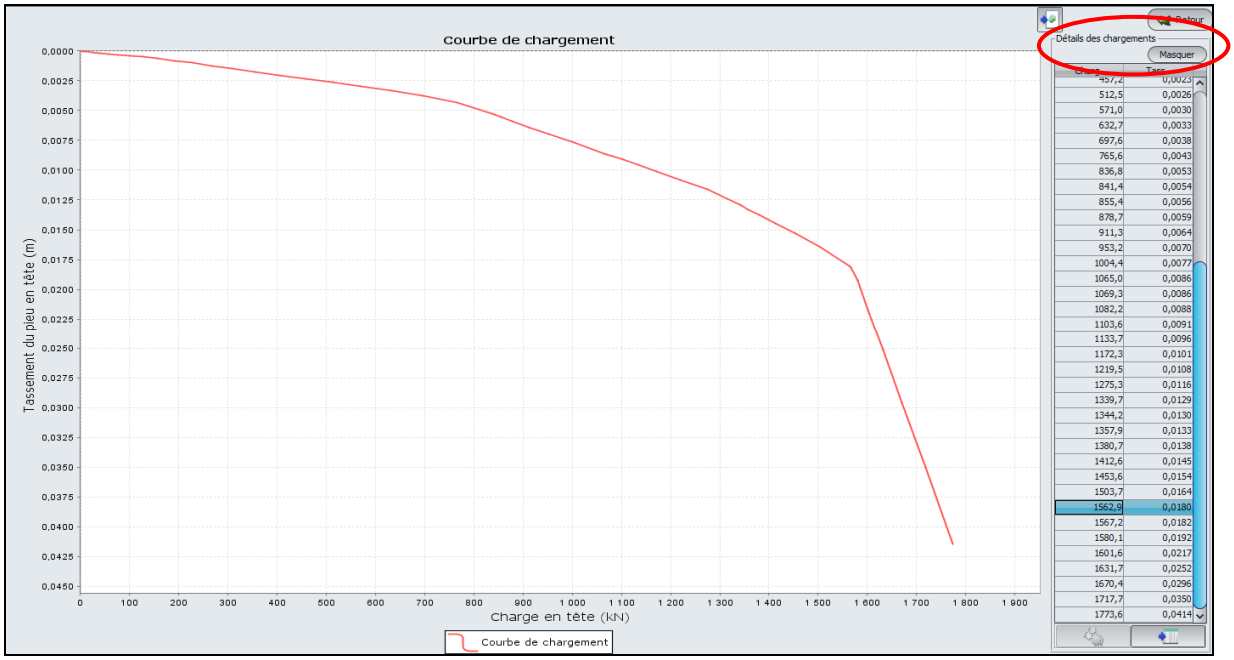


Figure F.47 Résultats graphiques – Courbes de chargement (calcul de pieu isolé)

Par défaut, seule la courbe est affichée. Un bouton Voir / Masquer en haut à droite de la fenêtre permet d'afficher ou de masquer le tableau de points calculés par Taspie+ pour construire la courbe de chargement.

F.3.9.3.2 Résultats principaux

Les courbes présentées sont quasiment identiques pour les 3 types de calcul (pieu isolé, pieu+maille associée type dallage et pieu+maille associée type remblai).

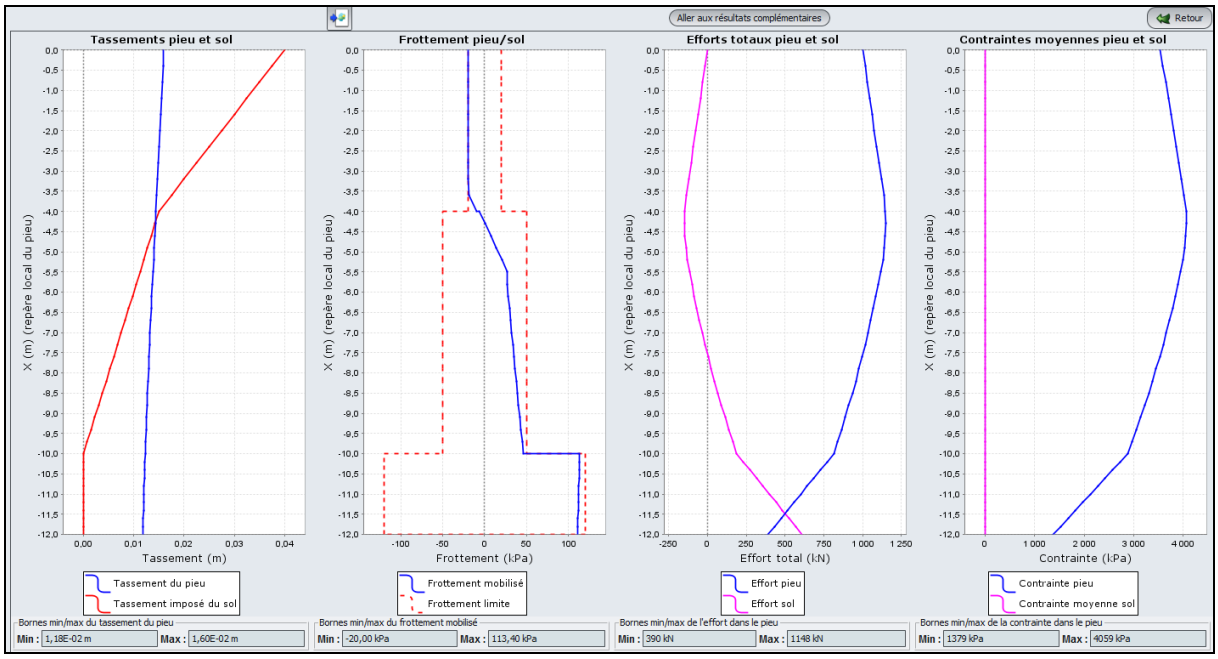


Figure F.48 Résultats graphiques – Résultats principaux (pieu isolé)

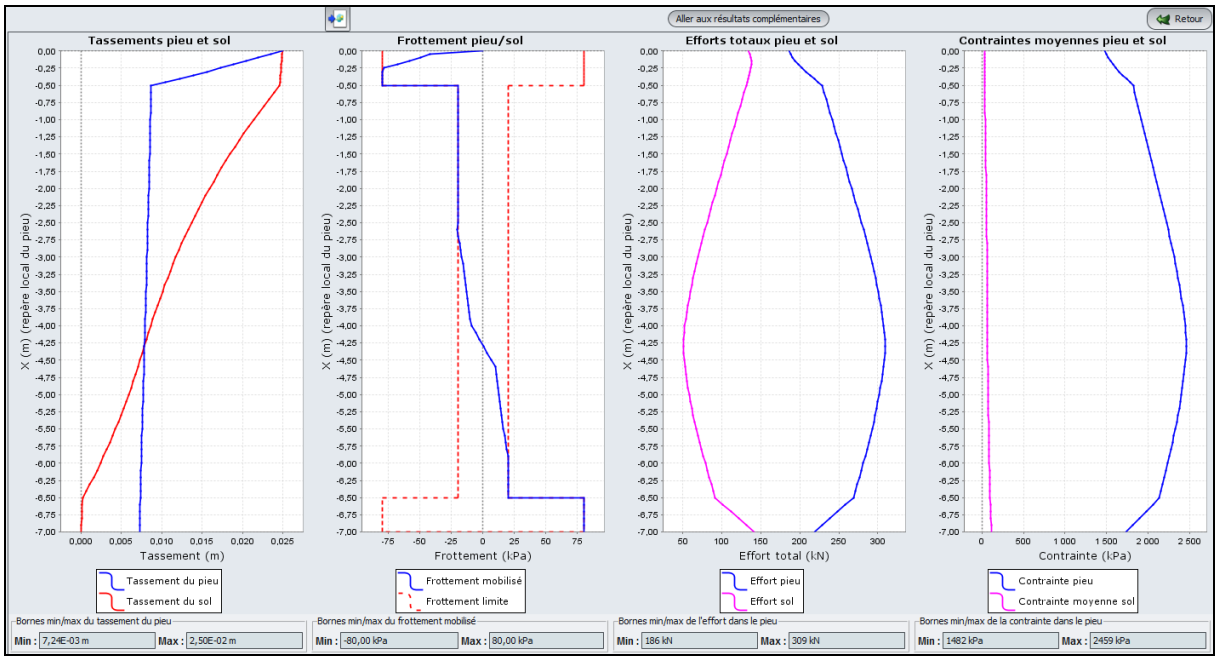


Figure F.49 Résultats graphiques – Résultats principaux (pieu + maille associée)

Les courbes principales présentent l'affichage graphique de 4 types de résultats en fonction de l'abscisse locale du pieu x(m) :

- Les tassements (m) : tassement du pieu résultant du calcul Taspie+ et tassement du sol. Concernant le tassement du sol, il s'agit :
  - ✓ Du tassement imposé du sol tel que défini dans les données dans le cas d'un calcul de type "pieu isolé" ;
  - ✓ Du tassement moyen du sol résultant du calcul Taspie+ dans le cas d'un calcul de type pieu+maille associée.
- Les frottements pieu/sol (kPa) : frottement mobilisé résultant du calcul Taspie+ et frottement limite tel que défini dans les données ;
- Les efforts totaux (kN) : effort dans le pieu et effort repris par le sol ;
- Les contraintes (kPa) : contrainte dans le pieu (effort/section) et la contrainte verticale moyenne dans le sol entre les pieux (cette dernière n'est pas calculée dans le cas d'un calcul de type pieu isolé).

Sous chaque courbe sont indiquées les valeurs minimales et maximales des grandeurs représentées.

F.3.9.3.3 Résultats complémentaires

Un clic sur le bouton Aller aux résultats complémentaires affiche les résultats complémentaires. Ceux-ci sont également accessibles directement depuis la fenêtre de choix des types de résultats :

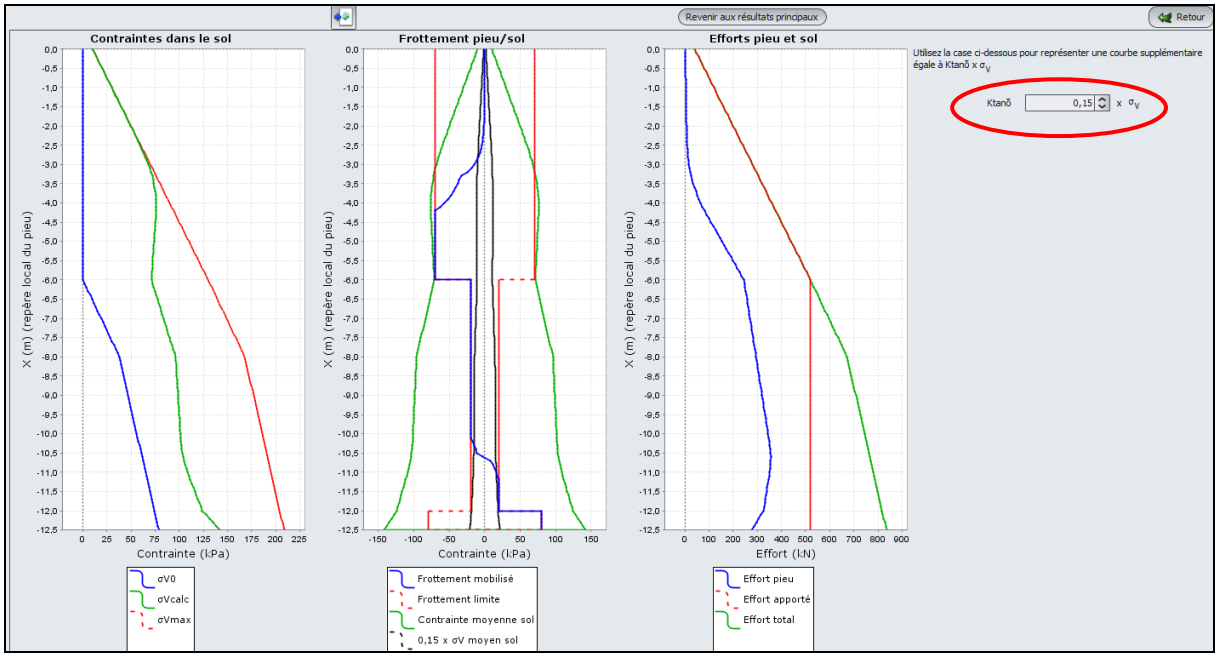


Figure F.50 Résultats graphiques – Résultats complémentaires

Les courbes principales présentent l'affichage graphique de 3 types de résultats en fonction de l'abscisse locale du pieu x(m):

- Les contraintes dans le sol (kPa) :
  - ✓ σ_{v0} : contrainte verticale initiale dans le sol ;
  - ✓ σ_{vcalc} : contrainte finale dans le sol résultant du calcul Taspie+ (correspondant à la colonne σ_{sol} du tableau de résultats) ;
  - ✓ σ_{vmax} : contrainte finale moyenne dans la maille (correspondant à la colonne σ_{maille} du tableau de résultats).

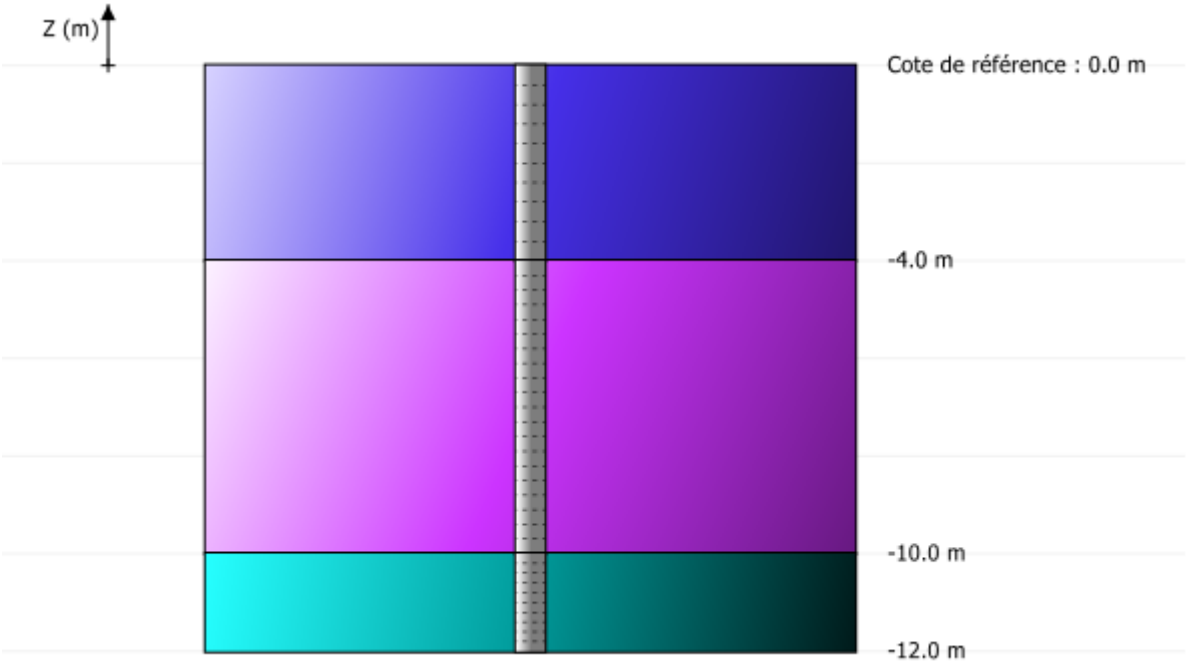
- Les frottements pieu/sol (kPa) :
  - ✓ Frottement mobilisé : frottement sol/pieu mobilisé résultant du calcul Taspie+ ;
  - ✓ Frottement limite : frottement unitaire limite tel que défini par l'utilisateur ;
  - ✓ Contrainte moyenne sol : contrainte finale dans le sol (correspondant à la colonne σ_{sol} du tableau de résultats) ;
  - ✓ Ktanδ x σ_v moyen sol : courbe précédente multipliée par la valeur de Ktanδ que l'utilisateur peut modifier en haut à droite de la fenêtre (valeur par défaut égale à 1,0). Voir aussi le chapitre F.2.6.1 et l'exemple 4 au chapitre F.4.4.
- Les efforts dans le pieu et dans le sol (kN) :
  - ✓ Effort dans le pieu (Q_{pieu}) ;
  - ✓ Effort apporté sur la maille (correspondant à la colonne ΔQ_{maille} du tableau de résultats) ;
  - ✓ Effort total dans la maille (correspondant à la colonne Q_{maille} du tableau de résultats).

F.4. Exemples de calcul Taspie+

F.4.1. Exemple 1 : Pieu isolé

Ce premier exemple porte sur un pieu isolé foré, de diamètre 0,6 m et soumis dans une première étape à une charge de 1000 kN.

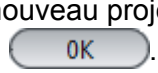
Dans une 2ème étape, on procédera à un calcul où le pieu est également soumis à un tassement du sol environnant.



F.4.1.1 Etape 1 : Pieu isolé

F.4.1.2 Saisie des données

- choisir de créer un nouveau projet en sélectionnant le radio-bouton

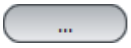
;
- cliquer sur le bouton 

.

Si Foxta est déjà ouvert, cliquer sur le menu "Fichier", "Nouveau projet".

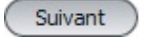
F.4.1.2.1 Assistant Nouveau projet

Cadre "Fichier"

- renseigner le chemin du fichier en cliquant sur le bouton 

;
- donner un nom au fichier et l'enregistrer.

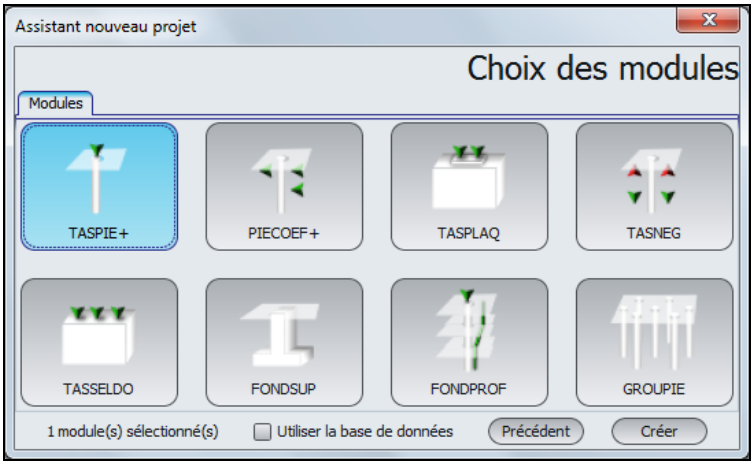
Cadre "Projet"

- donner un titre au projet ;
- saisir un numéro d'affaire ;
- compléter avec un commentaire si besoin ;
- laisser la case "Utiliser la base de données" décochée (nous n'utiliserons pas la base de données pour cet exemple), et cliquer sur le bouton 

.

F.4.1.2.2 Assistant Nouveau projet : Choix du module

- Dans la fenêtre "Choix des modules", sélectionner le module Taspie+ puis cliquer sur le bouton Créer.



Nota :
Foxta permet d'enregistrer ces couches de sol dans la base de données du projet et/ou dans la base de données globale des sols en cliquant sur le bouton Bases de données.

Ceci permet d'enregistrer les couches de sol avec leurs paramètres afin d'éviter de les ressaisir lors de l'utilisation d'un autre module pour le même projet Foxta, ou de la création d'un autre projet Foxta.

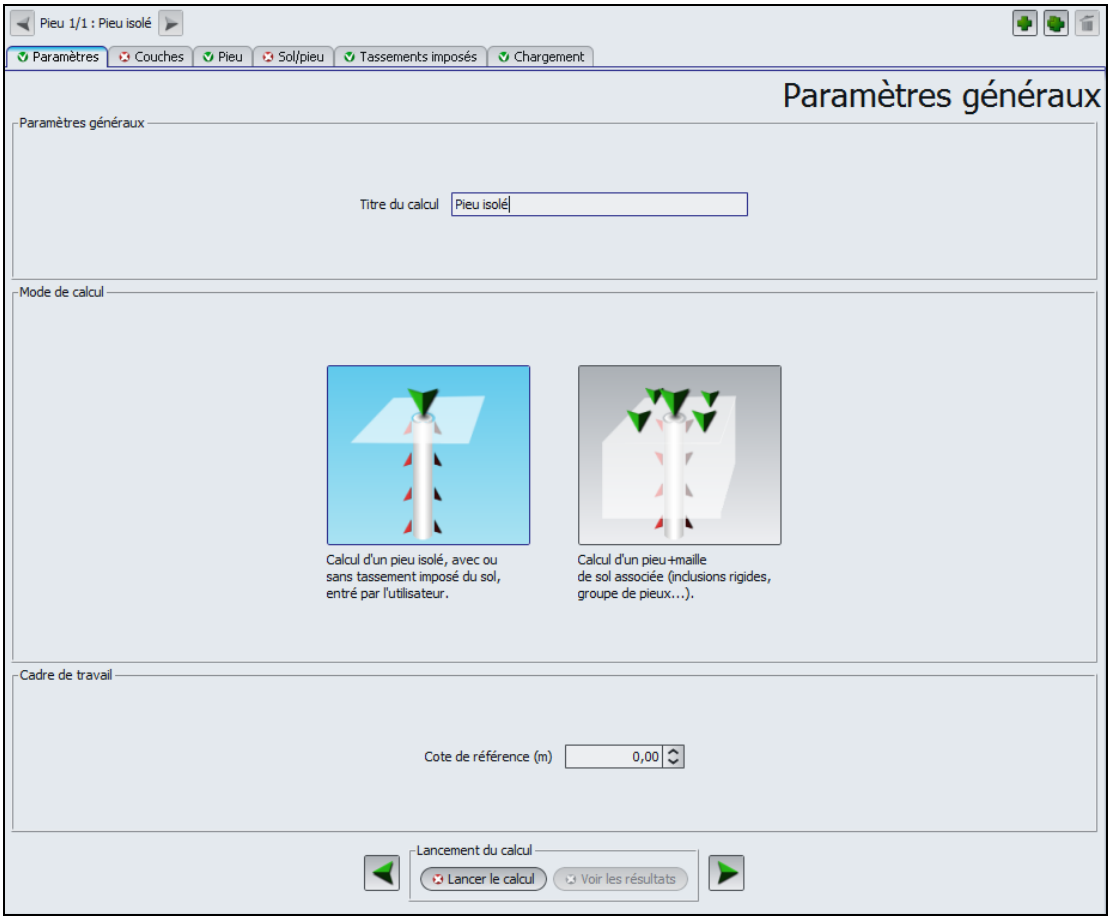
La base de données ne sera pas utilisée dans le cadre de cet exemple, mais son utilisation est décrite en détail dans la partie C du manuel.

La fenêtre de saisie des données Taspie+ apparaît.

Il convient à présent de compléter les différents onglets de données, dans la zone droite de l'écran.

F.4.1.2.3 Onglet "Paramètres"

Définition des paramètres généraux :



Cadre "Paramètre généraux" :

- Titre de calcul : Saisir 'pieu isolé' par exemple.

Cadre "Mode de calcul" :

- Choisir le type de calcul que l'on souhaite réaliser en cliquant sur le bouton adéquat. Ici : "Calcul d'un pieu isolé".

Cadre "Cadre de travail" :

- Cote de référence : 0,00 m (tête du pieu).

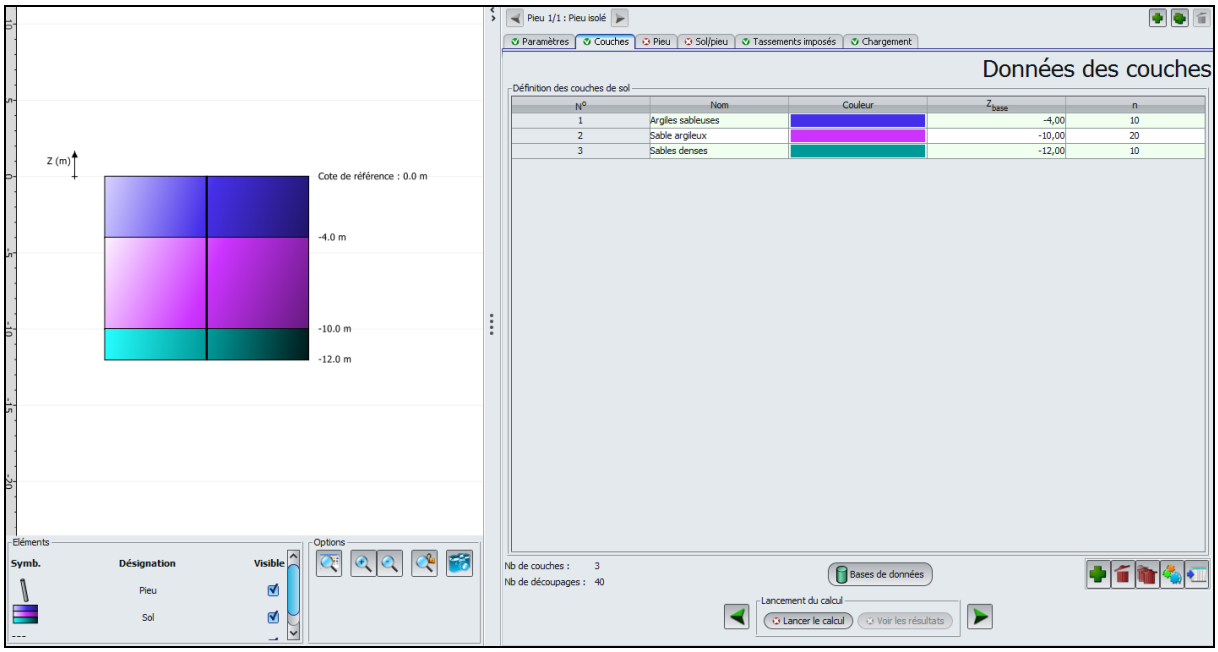
Pour passer à l'onglet suivant, cliquer soit sur le nom de l'onglet "Couches", soit sur le bouton .

F.4.1.2.4 Onglet "Couches"

Cet onglet permet de définir les caractéristiques des couches de sol :

- la cote de base de chaque couche Z_{base} (m) ;
- le nombre de subdivisions n de chaque couche.

RAPPEL : par convention dans Taspie+ pour un pieu isolé, le modèle est arrêté à la base du pieu (par contre, dans certains cas "pieu + maille associée", il est parfois nécessaire de prolonger le modèle sous la pointe des pieux, voir aussi chapitre F.2.7).



Les données à saisir ici sont les suivantes :

Couche	Nom	Z_{base} (m)	n
1	Argiles sableuses	-4,00	10
2	Sable argileux	-10,00	20
3	Sables denses	-12,00	10

Nota : les valeurs de discrétisation n correspondent ici à un découpage de chaque couche en tranches de calcul de 20 à 40 cm d'épaisseur.

F.4.1.2.5 Onglet "Pieu"

Nous allons définir dans cet onglet le type de pieu et ses paramètres : dans cet exemple, les caractéristiques du pieu (module d'Young E_{pieu} et diamètre D) restent les mêmes tout le long du pieu.

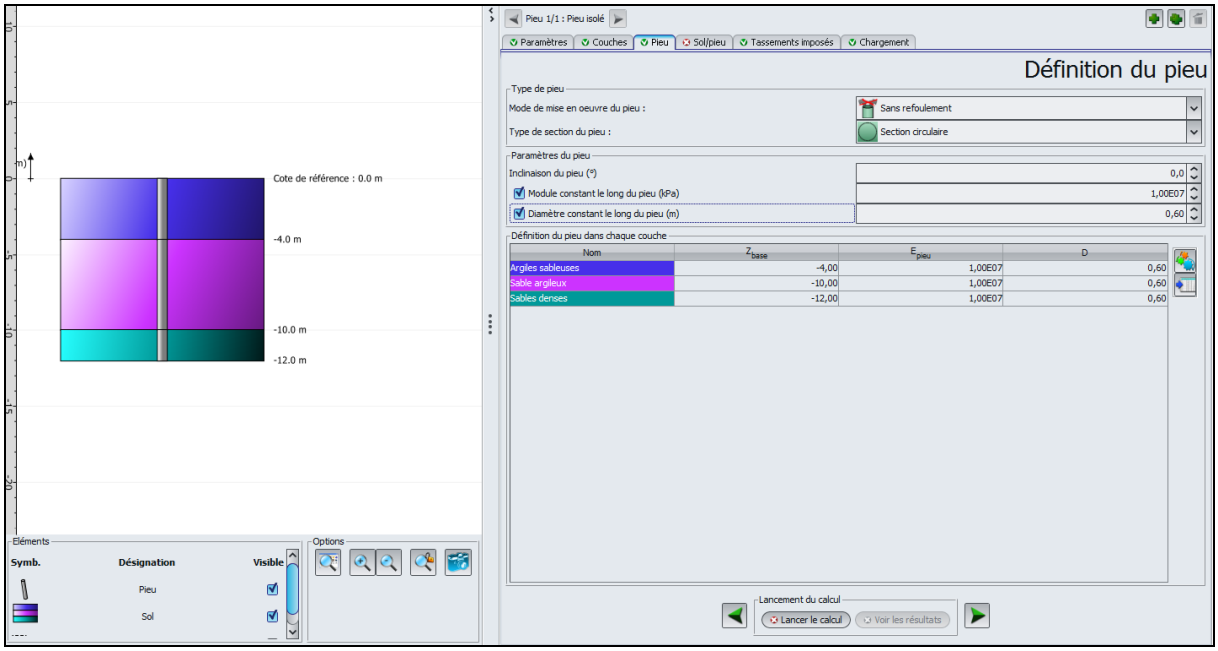
Cadre "Type de pieu" :

- mode de mise en œuvre : sélectionner dans la liste déroulante "Sans refoulement" (pieu foré) ;
- type de section du pieu : sélectionner dans la liste déroulante "Section circulaire".

Cadre "Paramètres du pieu" :

- inclinaison du pieu : 0° (pieu vertical) ;

- cocher la case "Module constant le long du pieu (kPa)" : E_{pieu} = 1,0E^{07} kPa (béton long terme) ;
- cocher la case "Diamètre constant le long pieu du pieu (m)" : D = 0,60 m.



Cadre "Définition du pieu dans chaque couche" :

Ce tableau reprend automatiquement les couches définies dans l'onglet précédent, avec pour chaque couche la valeur de Z_{base}, ainsi que le module d'Young et le diamètre saisis au-dessus du tableau (car ceux-ci ont été définis "constants le long du pieu"). Le tableau n'est donc donné ici que comme un rappel des données saisies (par contre, il est proposé en mode "saisie" lorsque le module et/ou le diamètre du pieu ne sont pas constants le long du pieu : il faut alors saisir une valeur par couche de sol) :

Nom	Z_{base} (m)	E_{pieu} (kPa)	D (m)
Argiles sableuses	-4,00	1,00E07	0,60
Sable argileux	-10,00	1,00E07	0,60
Sables denses	-12,00	1,00E07	0,60

F.4.1.2.6 Onglet "Sol/Pieu"

Cet onglet permet de définir les lois de mobilisation de frottement et l'effort en pointe.

La loi de mobilisation du frottement latéral utilisée ici est celle de Frank et Zhao construite à partir des valeurs pressiométriques. Le frottement latéral limite est pris égal à 20 kPa dans les argiles sableuses, 50 kPa dans les sables argileux et 120 kPa dans les sables denses.

Cadre "Loi mobilisation du frottement latéral du sol et de l'effort de pointe" :

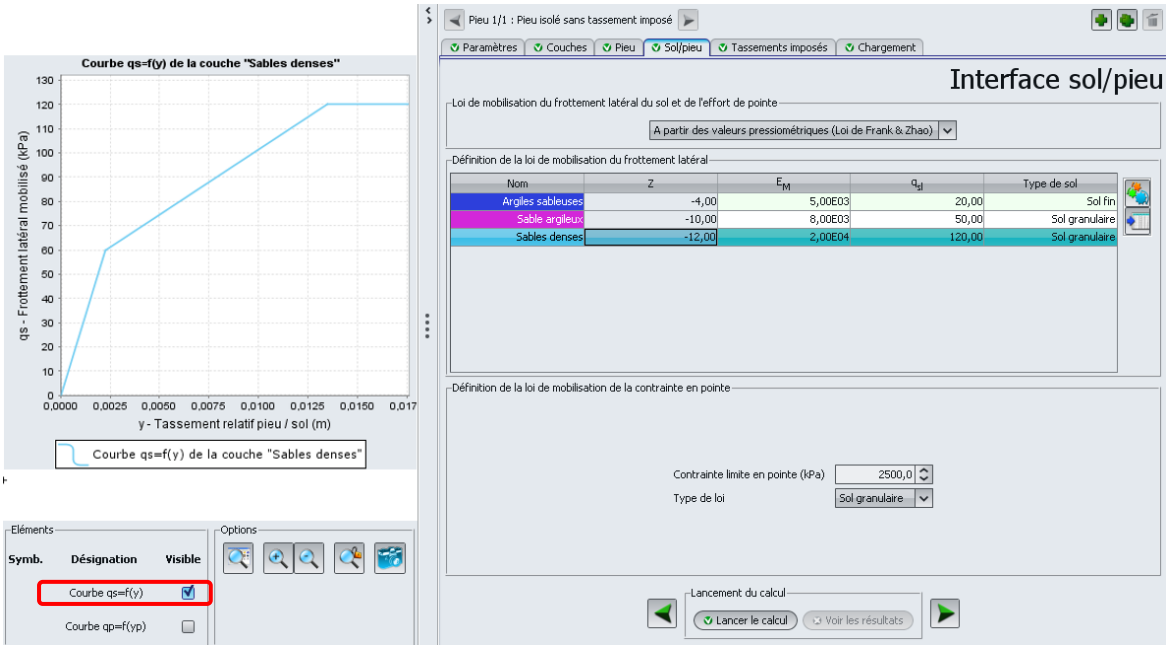
- Sélectionner dans la liste déroulante "A partir des valeurs pressiométriques (Loi de Frank & Zhao)". Il s'agit du choix par défaut.

Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011**

Cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral" :

Le tableau reprend automatiquement la liste des couches de sol définie précédemment. Les données à saisir pour chaque couche de sol sont les suivantes :

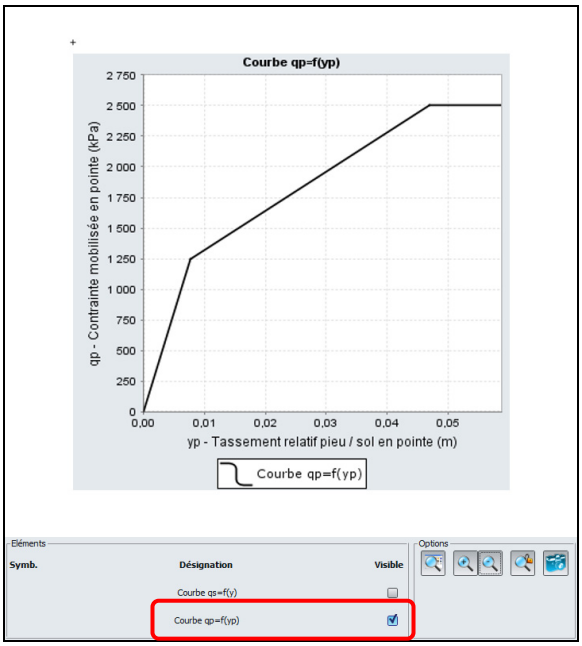
Nom	E_M (kPa)	q_{sl} (kPa)	Type de sol
Argiles sableuses	5,00E03	20,00	Sol fin
Sable argileux	8,00E03	50,00	Sol granulaire
Sables denses	2,00E04	120,00	Sol granulaire


Courbe qs=f(y) de la couche "Sables denses"
qs - Frottement latéral mobilisé (kPa)
y - Tassement relatif pieu / sol (m)
Courbe qs=f(y) de la couche "Sables denses"
Eléments
Symb.
Désignation
Visible
Courbe qs=f(y)
Courbe qp=f(yp)
Options
Pieu 1/1 : Pieu isolé sans tassement imposé
Paramètres
Couches
Pieu
Sol/pieu
Tassements imposés
Chargement
Interface sol/pieu
Loi de mobilisation du frottement latéral du sol et de l'effort de pointe
A partir des valeurs pressiométriques (Loi de Frank & Zhao)
Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral
Nom
Z
E_M
q_{sl}
Type de sol
Argiles sableuses -4,00 5,00E03 20,00 Sol fin
Sable argileux -10,00 8,00E03 50,00 Sol granulaire
Sables denses -12,00 2,00E04 120,00 Sol granulaire
Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe
Contrainte limite en pointe (kPa) 2500,0
Type de loi Sol granulaire
Lancement du calcul
Lancer le calcul
Voir les résultats

Cadre "Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe" :

La loi de mobilisation de la contrainte en pointe est celle de Frank et Zhao pour sol granulaire, avec une contrainte limite (k_p x pl_e) prise égale à 2500 kPa :

- contrainte limite en pointe : saisir la valeur 2500 kPa ;
- type de loi : sélectionner dans la liste déroulante "Sol granulaire".

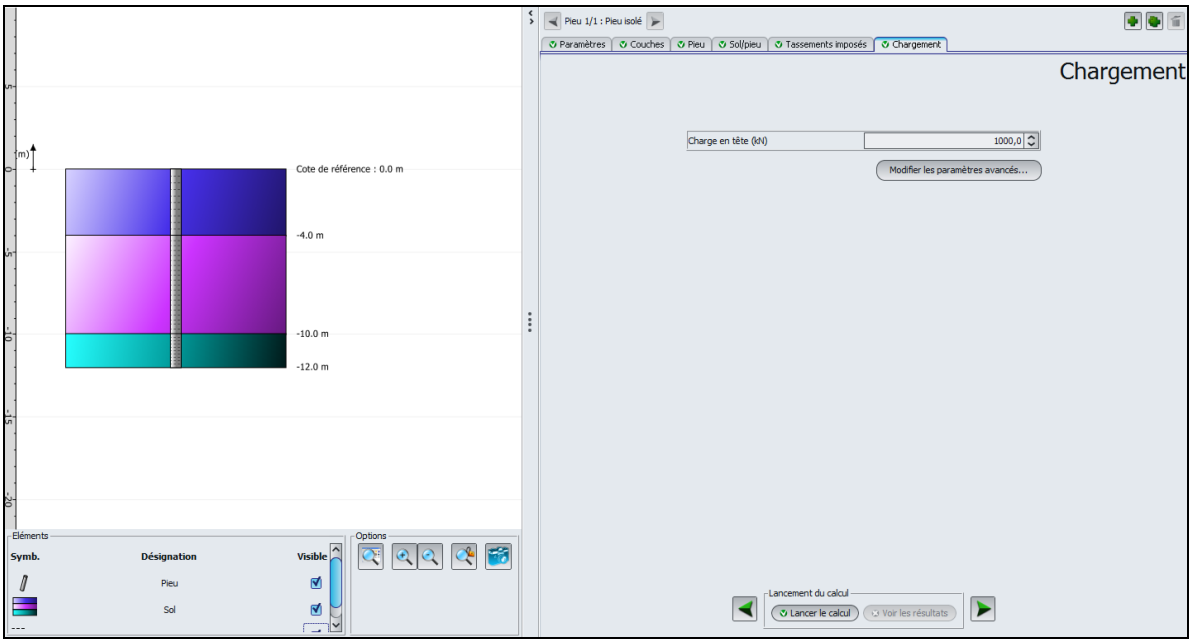


F.4.1.2.7 Onglet "Tassement imposé"

- Laisser la case "Définir un profil de tassement imposé du sol" décochée car nous ne souhaitons pas imposer de tassement du sol autour du pieu dans cette partie de l'exemple.

F.4.1.2.8 Onglet "Chargement"

Cet onglet permet de définir les conditions de chargement en tête du pieu.

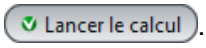


- Charge en tête : saisir la valeur de 1000 kN.

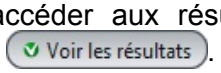
Nous ne modifierons pas les paramètres avancés dans cet exemple (ce qui revient à conserver les paramètres par défaut).

F.4.1.3 Calcul et Résultats

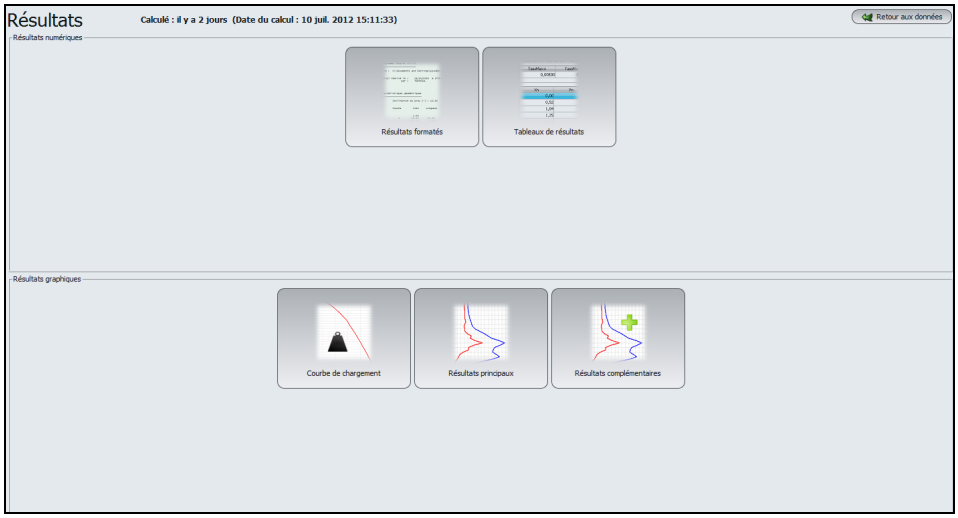
F.4.1.3.1 Calcul

Cliquer sur le bouton 

.

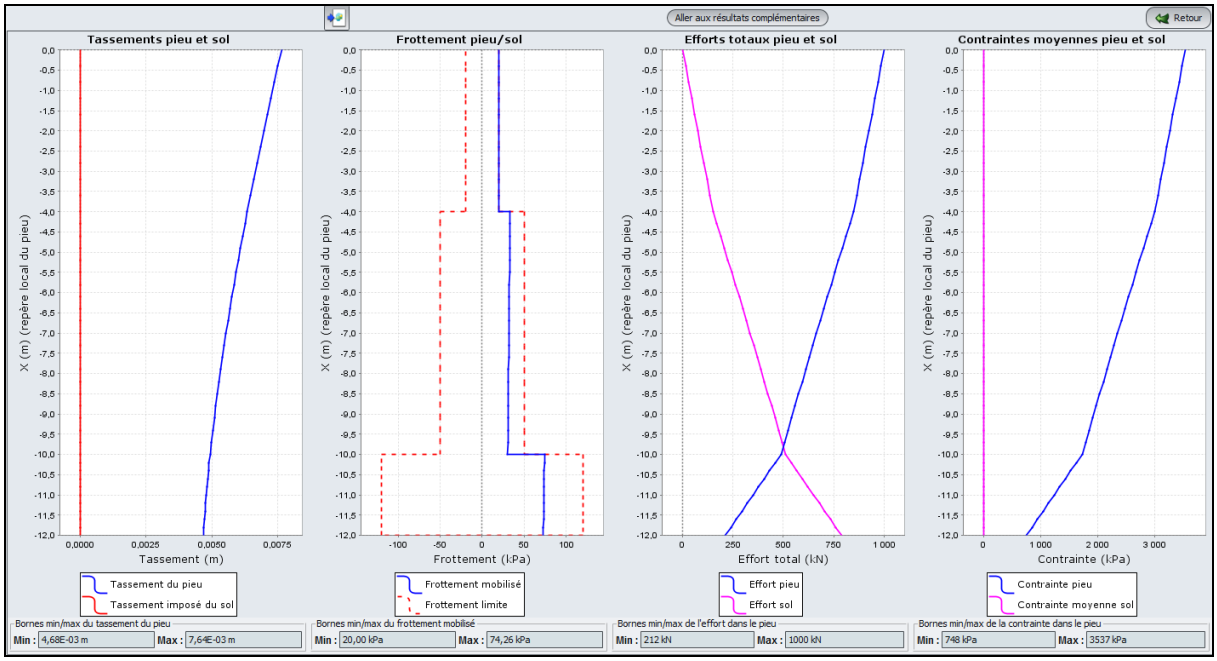
Pour accéder aux résultats sous forme de tableaux et de graphiques, cliquer sur le bouton 

.



F.4.1.3.2 Résultats graphiques

Résultats principaux

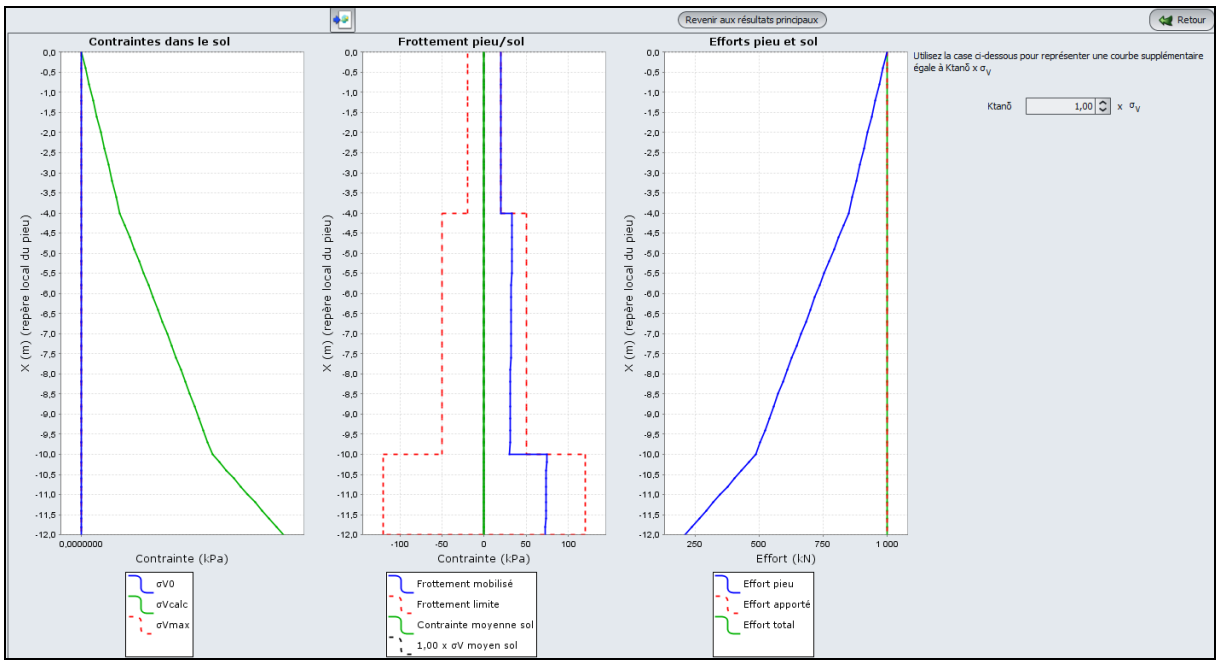


On observe que :

- le tassement maximal du pieu est de 7,64 mm. Il est obtenu en tête, tandis que la pointe du pieu tasse de 4,7 mm. Le tassement imposé du sol est nul (puisque nous n'avons pas défini de tassement imposé dans les données) ;
- le frottement limite est mobilisé complètement dans les argiles sableuses (jusqu'à 4 m de profondeur), et n'est mobilisé que partiellement dans le sable argileux et les sables denses ;
- l'effort dans le pieu est maximal en tête et vaut 1000 kN (charge appliquée en tête). Cet effort est dissipé ensuite en profondeur par frottement latéral. A la base du pieu, l'effort dans le pieu est de 212 kN (effort de pointe), tandis que l'effort repris par le sol est de 788 (= 1000-212) kN (c'est la résultante du frottement latéral mobilisé) ;
- la contrainte moyenne dans le sol n'est pas calculée ici (calcul de type "pieu isolé"). La contrainte dans le pieu est égale à l'effort dans le pieu divisé par sa section : elle diminue donc avec la profondeur (3537 kPa en tête et 748 kPa en pointe).

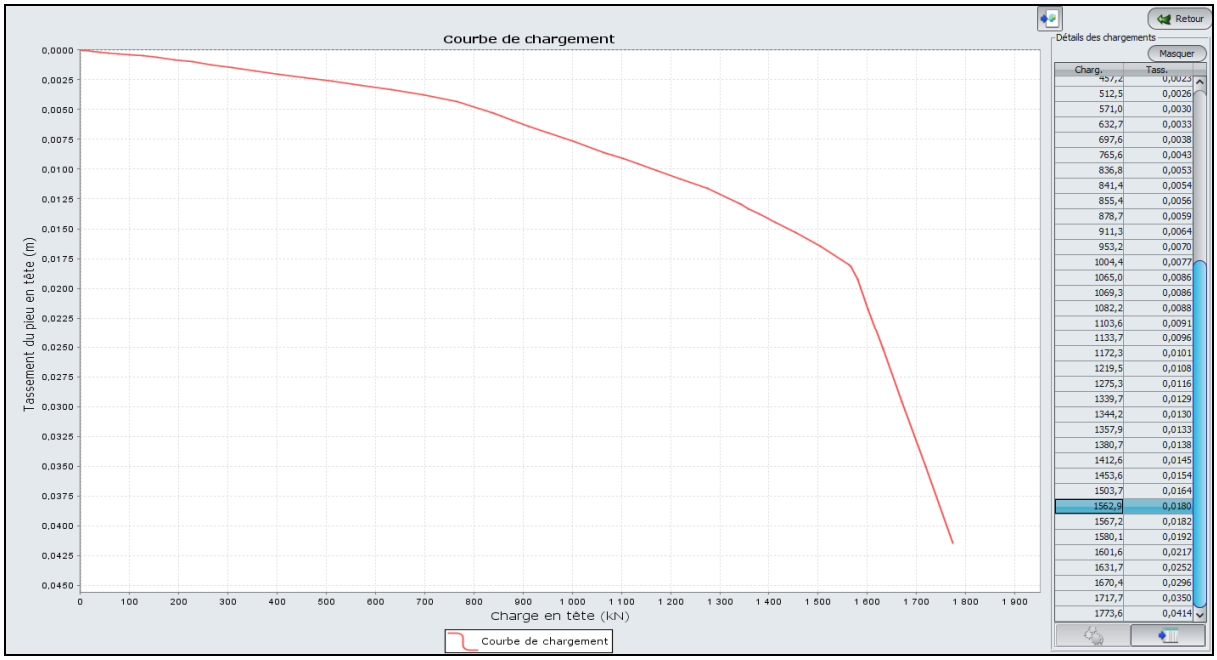
Un clic sur le bouton Aller aux résultats complémentaires affiche les courbes des contraintes dans le sol, du frottement pieu/sol et des efforts pieu et sol :

Dans notre exemple de pieu isolé, ces résultats complémentaires n'apportent pas d'informations supplémentaires.



Pour afficher la courbe de chargement, cliquer sur le bouton Retour puis sur "Courbe de chargement".

Cette courbe, disponible pour les calculs de type "pieu isolé", est construite automatiquement par Taspie+ pour une charge en tête allant de 0 jusqu'à 95 % de la charge à la rupture.



F.4.1.3.3 Résultats numériques

On retrouve notamment à la fin du fichier la valeur de tassement obtenue pour la charge de 1000 kN, ainsi que la raideur en tête correspondante.

```
Caractéristiques mécaniques
___________________________

        Couche        Cote     Longueur    éléments  Frottement    Module       Module     G ou G' iG
                                                       limite      du pieu      du sol
                      0.00
            1        -4.00        4.00         10        20.00    0.100E+08   0.100E+11      0.00   0
            2       -10.00        6.00         20        50.00    0.100E+08   0.100E+11      0.00   0
            3       -12.00        2.00         10       120.00    0.100E+08   0.100E+11      0.00   0
                                 ------                 ------    ------------------------------------
                                 12.00         qpl =   2500.00    S(Hi/Ei) =  0.000E+00

                                                                  Tassement poids propre   0.0000
                                                                  Tassement sans pieu      0.0000

                                                                  Supplément poids colonne          0.00

Lois de mobilisation
____________________

    Couche  1                              cotes :     0.000 à    -4.000

        Em    =     5000.        qsl  =     20.00

        mobilisation frottement   y          qs                        *** Frank et Zhao (sol fin foré)

                                0.0006      10.00
                                0.0036      20.00

    Couche  2                              cotes :    -4.000 à    -10.000

        Em    =     8000.        qsl  =     50.00

        mobilisation frottement   y          qs                        *** Frank et Zhao (sol granulaire foré)

                                0.0023      25.00
                                0.0141      50.00

    Couche  3                              cotes :   -10.000 à    -12.000

        Em    =    20000.        qsl  =    120.00

        mobilisation frottement   y          qs                        *** Frank et Zhao (sol granulaire foré)

                                0.0022      60.00
                                0.0135     120.00

        mobilisation pointe                                          *** Frank et Zhao (sol granulaire foré)

                                 y          qp            Qp

                                0.0078    1250.00        353.43
                                0.0469    2500.00        706.86

CAPACITE PORTANTE
```

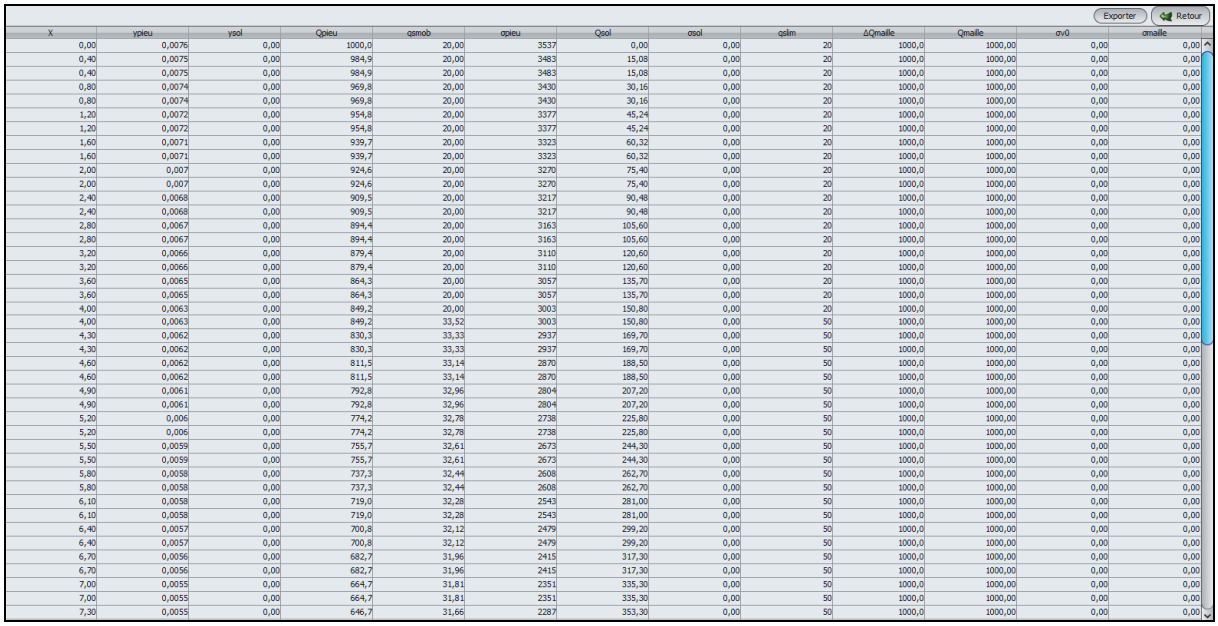
019	-6.400	0.568E-02	0.000E+00	0.701E+03	0.299E+03	0.321E+02	0.248E+04	0.299E-07
019	-6.700	0.561E-02	0.000E+00	0.683E+03	0.317E+03	0.320E+02	0.241E+04	0.317E-07
020	-6.700	0.561E-02	0.000E+00	0.683E+03	0.317E+03	0.320E+02	0.241E+04	0.317E-07
020	-7.000	0.553E-02	0.000E+00	0.665E+03	0.335E+03	0.318E+02	0.235E+04	0.335E-07
021	-7.000	0.553E-02	0.000E+00	0.665E+03	0.335E+03	0.318E+02	0.235E+04	0.335E-07
021	-7.300	0.547E-02	0.000E+00	0.647E+03	0.353E+03	0.317E+02	0.229E+04	0.353E-07
022	-7.300	0.547E-02	0.000E+00	0.647E+03	0.353E+03	0.317E+02	0.229E+04	0.353E-07
022	-7.600	0.540E-02	0.000E+00	0.629E+03	0.371E+03	0.315E+02	0.222E+04	0.371E-07
023	-7.600	0.540E-02	0.000E+00	0.629E+03	0.371E+03	0.315E+02	0.222E+04	0.371E-07
023	-7.900	0.533E-02	0.000E+00	0.611E+03	0.389E+03	0.314E+02	0.216E+04	0.389E-07
024	-7.900	0.533E-02	0.000E+00	0.611E+03	0.389E+03	0.314E+02	0.216E+04	0.389E-07
024	-8.200	0.527E-02	0.000E+00	0.593E+03	0.407E+03	0.312E+02	0.210E+04	0.407E-07
025	-8.200	0.527E-02	0.000E+00	0.593E+03	0.407E+03	0.312E+02	0.210E+04	0.407E-07
025	-8.500	0.521E-02	0.000E+00	0.576E+03	0.424E+03	0.311E+02	0.204E+04	0.424E-07
026	-8.500	0.521E-02	0.000E+00	0.576E+03	0.424E+03	0.311E+02	0.204E+04	0.424E-07
026	-8.800	0.515E-02	0.000E+00	0.558E+03	0.442E+03	0.310E+02	0.197E+04	0.442E-07
027	-8.800	0.515E-02	0.000E+00	0.558E+03	0.442E+03	0.310E+02	0.197E+04	0.442E-07
027	-9.100	0.509E-02	0.000E+00	0.541E+03	0.459E+03	0.309E+02	0.191E+04	0.459E-07
028	-9.100	0.509E-02	0.000E+00	0.541E+03	0.459E+03	0.309E+02	0.191E+04	0.459E-07
028	-9.400	0.503E-02	0.000E+00	0.523E+03	0.477E+03	0.307E+02	0.185E+04	0.477E-07
029	-9.400	0.503E-02	0.000E+00	0.523E+03	0.477E+03	0.307E+02	0.185E+04	0.477E-07
029	-9.700	0.498E-02	0.000E+00	0.506E+03	0.494E+03	0.306E+02	0.179E+04	0.494E-07
030	-9.700	0.498E-02	0.000E+00	0.506E+03	0.494E+03	0.306E+02	0.179E+04	0.494E-07
030	-10.000	0.492E-02	0.000E+00	0.489E+03	0.511E+03	0.305E+02	0.173E+04	0.511E-07
031	-10.000	0.492E-02	0.000E+00	0.489E+03	0.511E+03	0.743E+02	0.173E+04	0.511E-07
031	-10.200	0.489E-02	0.000E+00	0.461E+03	0.539E+03	0.741E+02	0.163E+04	0.539E-07
032	-10.200	0.489E-02	0.000E+00	0.461E+03	0.539E+03	0.741E+02	0.163E+04	0.539E-07
032	-10.400	0.486E-02	0.000E+00	0.433E+03	0.567E+03	0.739E+02	0.153E+04	0.567E-07
033	-10.400	0.486E-02	0.000E+00	0.433E+03	0.567E+03	0.739E+02	0.153E+04	0.567E-07
033	-10.600	0.483E-02	0.000E+00	0.405E+03	0.595E+03	0.738E+02	0.143E+04	0.595E-07
034	-10.600	0.483E-02	0.000E+00	0.405E+03	0.595E+03	0.738E+02	0.143E+04	0.595E-07
034	-10.800	0.480E-02	0.000E+00	0.377E+03	0.623E+03	0.736E+02	0.133E+04	0.623E-07
035	-10.800	0.480E-02	0.000E+00	0.377E+03	0.623E+03	0.736E+02	0.133E+04	0.623E-07
035	-11.000	0.478E-02	0.000E+00	0.350E+03	0.650E+03	0.735E+02	0.124E+04	0.650E-07
036	-11.000	0.478E-02	0.000E+00	0.350E+03	0.650E+03	0.735E+02	0.124E+04	0.650E-07
036	-11.200	0.475E-02	0.000E+00	0.322E+03	0.678E+03	0.733E+02	0.114E+04	0.678E-07
037	-11.200	0.475E-02	0.000E+00	0.322E+03	0.678E+03	0.733E+02	0.114E+04	0.678E-07
037	-11.400	0.473E-02	0.000E+00	0.294E+03	0.706E+03	0.732E+02	0.104E+04	0.706E-07
038	-11.400	0.473E-02	0.000E+00	0.294E+03	0.706E+03	0.732E+02	0.104E+04	0.706E-07
038	-11.600	0.471E-02	0.000E+00	0.267E+03	0.733E+03	0.731E+02	0.943E+03	0.733E-07
039	-11.600	0.471E-02	0.000E+00	0.267E+03	0.733E+03	0.731E+02	0.943E+03	0.733E-07
039	-11.800	0.469E-02	0.000E+00	0.239E+03	0.761E+03	0.730E+02	0.846E+03	0.761E-07
040	-11.800	0.469E-02	0.000E+00	0.239E+03	0.761E+03	0.730E+02	0.846E+03	0.761E-07
040	-12.000	0.468E-02	0.000E+00	0.212E+03	0.788E+03	0.729E+02	0.748E+03	0.788E-07

	tassement pieu	tassement sol	effort pieu	effort sol	frottement latéral	dsigma pieu	dsigma sol
max+	0.765E-02	0.000E+00	0.100E+04	0.788E+03	0.743E+02	0.354E+04	0.788E-07
max-	0.468E-02	0.000E+00	0.212E+03	0.000E+00	0.200E+02	0.748E+03	0.000E+00

```
RAIDEUR EQUIVALENTE

=============================================================================================
                                                        Charge      Déplacement      Raideur

  --- Sous une charge égale à 70% de la charge de fluage   820.05       0.00505     0.162E+06
  --- Sous la charge définie par l'utilisateur            1000.00       0.00765     0.131E+06

=============================================================================================
```

Tableau des résultats

Ce tableau permet de visualiser les valeurs obtenues pour chaque cote le long du pieu. Un export au format MS Excel permettra l'exploitation des résultats.



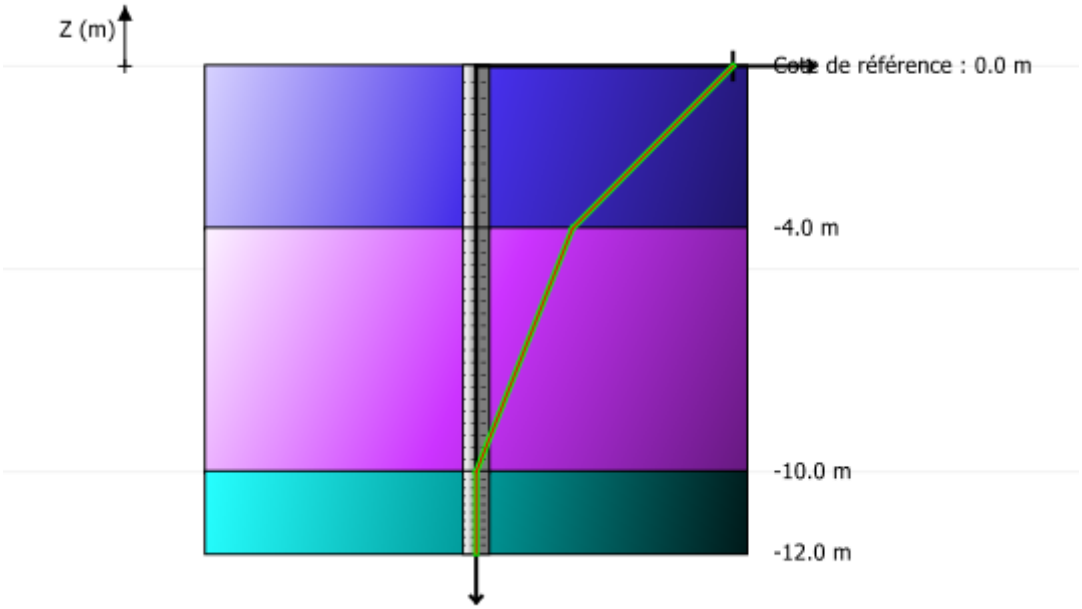
Exporter | Retour

X	ypieu	ysol	Qpieu	qsmob	qpieu	Qsol	σsol	qslim	ΔQmaille	Qmaille	σv0	σmaille
0,00	0,0076	0,00	1000,0	20,00	3537	0,00	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
0,40	0,0075	0,00	984,9	20,00	3483	15,08	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
0,40	0,0075	0,00	984,9	20,00	3483	15,08	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
0,80	0,0074	0,00	969,8	20,00	3430	30,16	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
0,80	0,0074	0,00	969,8	20,00	3430	30,16	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
1,20	0,0072	0,00	954,8	20,00	3377	45,24	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
1,20	0,0072	0,00	954,8	20,00	3377	45,24	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
1,60	0,0071	0,00	939,7	20,00	3323	60,32	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
1,60	0,0071	0,00	939,7	20,00	3323	60,32	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,00	0,007	0,00	924,6	20,00	3270	75,40	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,00	0,007	0,00	924,6	20,00	3270	75,40	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,40	0,0068	0,00	909,5	20,00	3217	90,48	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,40	0,0068	0,00	909,5	20,00	3217	90,48	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,80	0,0067	0,00	894,4	20,00	3163	105,60	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
2,80	0,0067	0,00	894,4	20,00	3163	105,60	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
3,20	0,0066	0,00	879,4	20,00	3110	120,60	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
3,20	0,0066	0,00	879,4	20,00	3110	120,60	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
3,60	0,0065	0,00	864,3	20,00	3057	135,70	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
3,60	0,0065	0,00	864,3	20,00	3057	135,70	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,00	0,0063	0,00	849,2	20,00	3003	150,80	0,00	20	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,00	0,0063	0,00	849,2	33,52	3003	150,80	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,30	0,0062	0,00	830,3	33,33	2937	169,70	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,30	0,0062	0,00	830,3	33,33	2937	169,70	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,60	0,0062	0,00	811,5	33,14	2870	188,50	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,60	0,0062	0,00	811,5	33,14	2870	188,50	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,90	0,0061	0,00	792,8	32,96	2804	207,20	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
4,90	0,0061	0,00	792,8	32,96	2804	207,20	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,20	0,006	0,00	774,2	32,78	2738	225,80	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,20	0,006	0,00	774,2	32,78	2738	225,80	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,50	0,0059	0,00	755,7	32,61	2673	244,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,50	0,0059	0,00	755,7	32,61	2673	244,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,80	0,0058	0,00	737,3	32,44	2608	262,70	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
5,80	0,0058	0,00	737,3	32,44	2608	262,70	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,10	0,0058	0,00	719,0	32,28	2543	281,00	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,10	0,0058	0,00	719,0	32,28	2543	281,00	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,40	0,0057	0,00	700,8	32,12	2479	299,20	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,40	0,0057	0,00	700,8	32,12	2479	299,20	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,70	0,0056	0,00	682,7	31,96	2415	317,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
6,70	0,0056	0,00	682,7	31,96	2415	317,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
7,00	0,0055	0,00	664,7	31,81	2351	335,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
7,00	0,0055	0,00	664,7	31,81	2351	335,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00
7,30	0,0055	0,00	646,7	31,66	2287	353,30	0,00	50	1000,0	1000,00	0,00	0,00

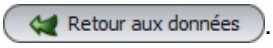
*Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011***

F.4.1.4 Etape 2 : Pieu isolé avec tassements imposés du sol

On reprend ici le même exemple, mais cette fois nous allons définir un tassement imposé du sol environnant.



F.4.1.5 Modification des données

Pour modifier des données, cliquer sur le bouton 

.
Puis enregistrer votre projet sous un autre nom.

Nota : il aurait également été possible de dupliquer le pieu au sein du même projet (voir l'exemple 2).

F.4.1.5.1 Onglet "Paramètres"

- Changer le titre du calcul : "Pieu isolé avec tassement imposé du sol", par exemple.

F.4.1.5.2 Onglet "Tassements imposés"

- Cocher la case "Définir un profil de tassement imposé du sol".

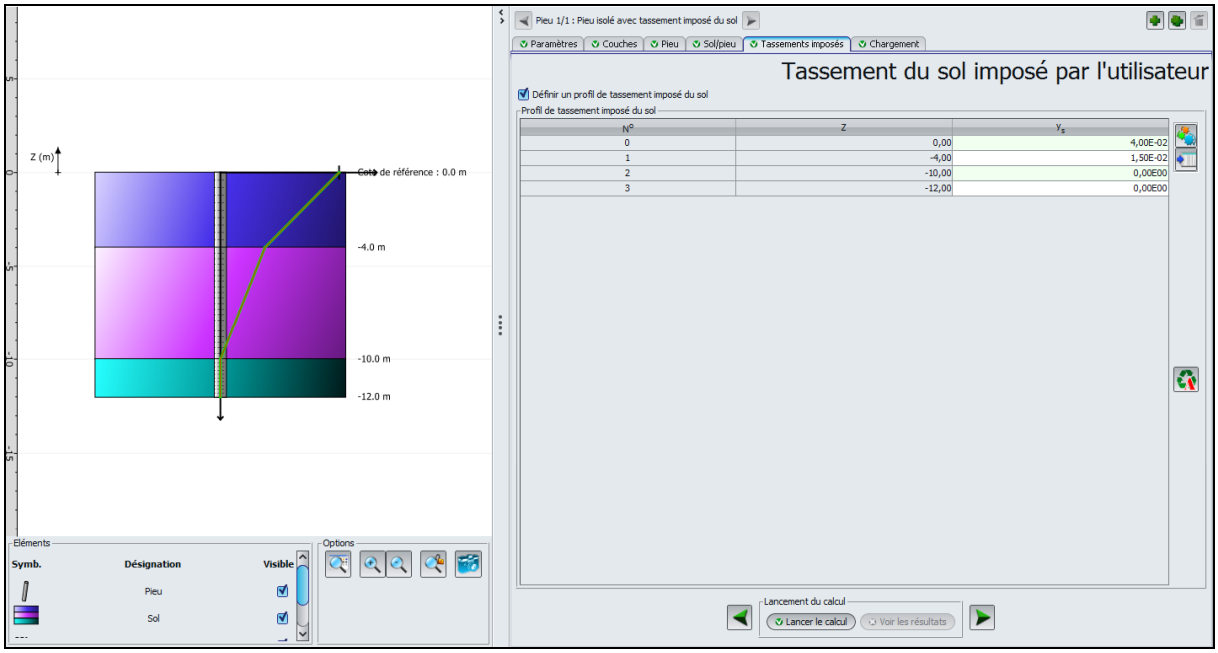
Cadre "Profil de tassement imposé du sol"

On propose ici de saisir le profil de tassement du sol y_s suivant :

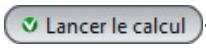
- y_s = 4 cm à la cote 0,0 m (en surface) ;
- y_s = 1,5 cm à la cote -4,0 m (à la base de la première couche) ;
- y_s = 0 cm à la cote -10,0 m et dessous (à la base des couches suivantes).

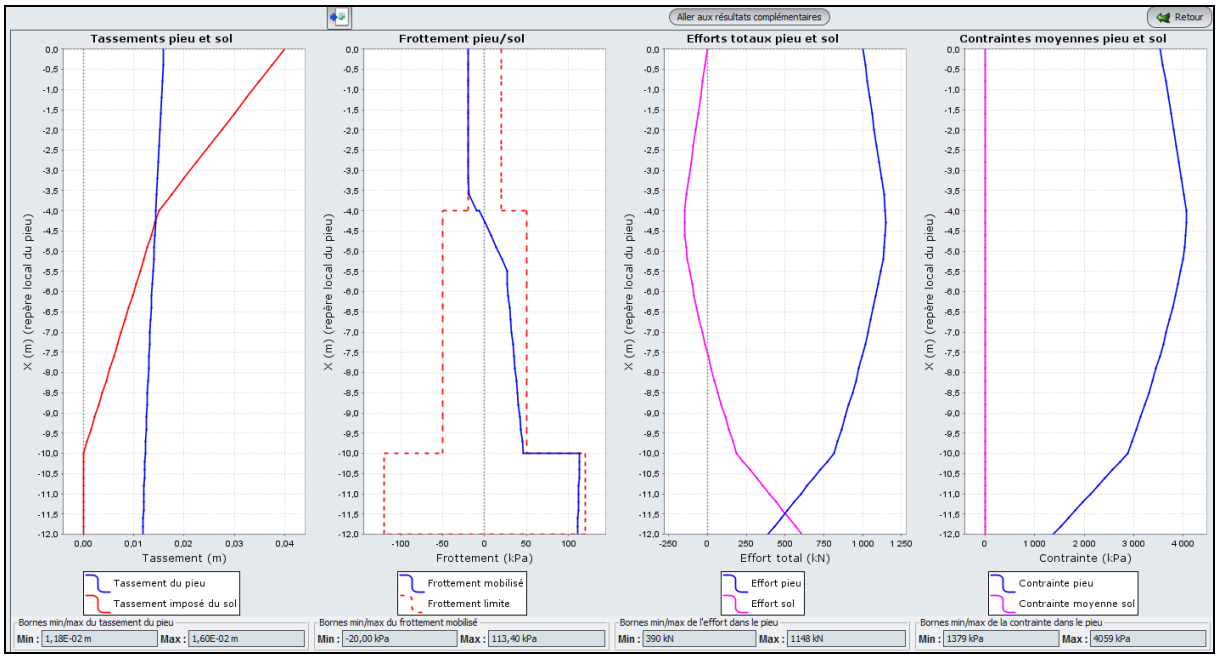
Les données à saisir sont donc les suivantes :

N°	Z (m)	y_s (m)
0	0,00	4,00E-02
1	-4,00	1,50E-02
2	-10,00	0,00E00
3	-12,00	0,00E00



F.4.1.6 Calcul et résultats

Relancer le calcul en cliquant sur le bouton 
.

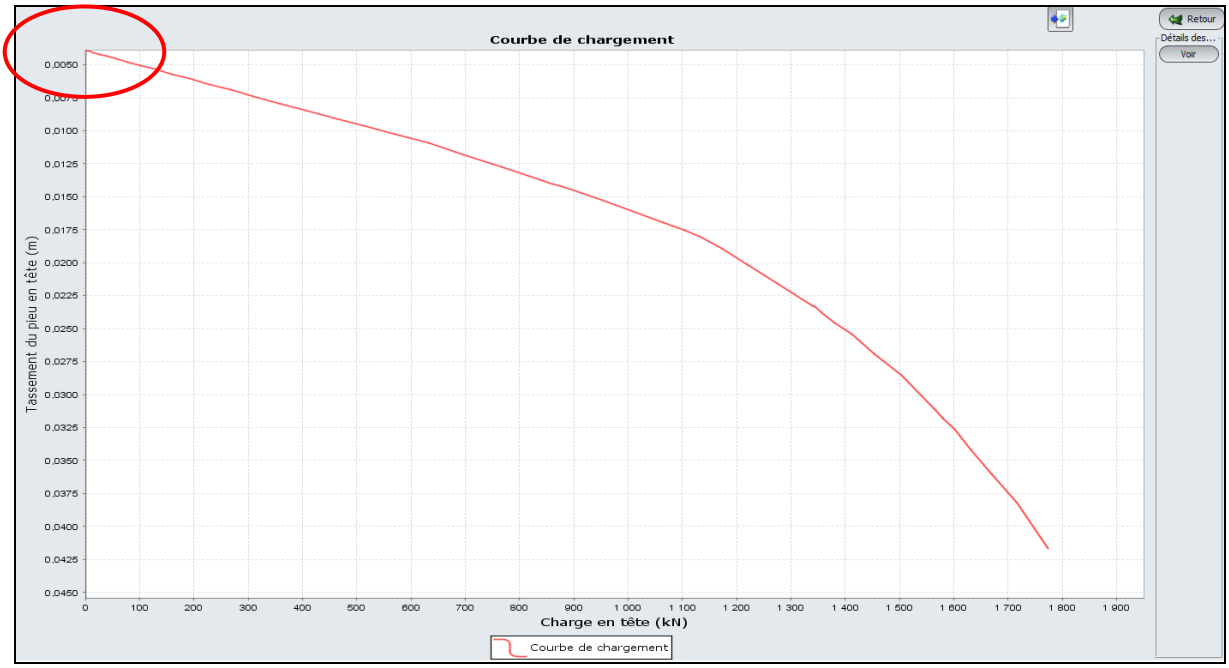


On observe que :

- le tassement maximal du pieu est de 1,60 cm. Il est obtenu en tête, tandis que la pointe du pieu tasse de 1,2 cm (les tassements ont plus que doublé par rapport à l'étape 1). Le tassement imposé du sol n'est plus nul : on retrouve le tassement imposé défini dans les données ;
- jusqu'à 4m de profondeur, le sol tasse plus que le pieu ce qui se traduit par un frottement négatif (effet d'accrochage). A partir de cette profondeur, dite "plan neutre", le pieu tasse plus que le sol et le frottement redevient positif. La portance du pieu doit être vérifiée à partir du plan neutre ;

- l'effort maximal dans le pieu n'est pas obtenu en tête mais au niveau du plan neutre et vaut 1148 kN : cette valeur correspond à la charge appliquée en tête (1000 kN) + la résultante du frottement négatif mobilisé au dessus du plan neutre (148 kN).

Pour d'afficher la courbe de chargement, cliquer sur le bouton Retour puis sur "Courbe de chargement". Notons que pour une charge nulle en tête, le tassement du pieu est différent de zéro : il s'agit du tassement produit uniquement par l'effet d'accrochage du sol.



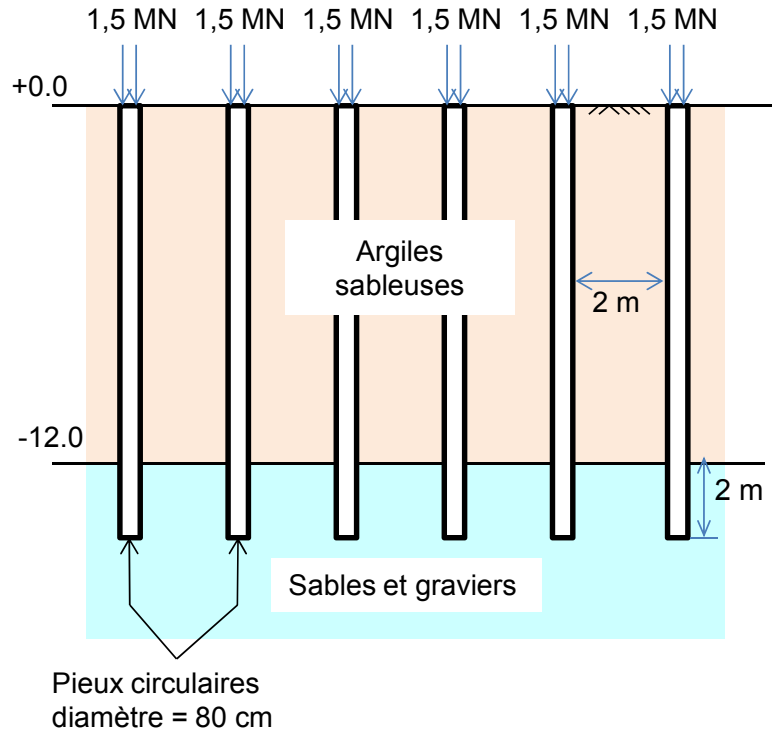
On retrouve dans le tableau ci-dessous un comparatif des résultats des 2 calculs (sans puis avec tassement imposé du sol autour du pieu) :

	Tassement du pieu (cm)		**Frottement mobilisé (kPa)**		**Effort dans le pieu (kN)**		**Contrainte dans le pieu (kPa)**	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Pieu isolé sans tassement imposé du sol	0.47	0.77	20	74	212	1000	748	3537
Pieu isolé avec tassement imposé du sol	1.18	1.60	-20	113	390	1148	1379	4059

F.4.2. Exemple 2 : Groupe de pieux et frottement négatif

Cet exemple illustre le traitement sous Taspie+ du cas d'un groupe de pieux soumis à un frottement négatif.

Le projet étudié est illustré dans la figure ci-dessous. Il s'agit d'un groupe de pieux de 80 cm de diamètre et de 14 m de profondeur, ancrés dans un sol bicouche. Les pieux sont disposés selon un maillage régulier de 2 m x 2 m, et reprenant chacun une charge en tête de 1500 kN.

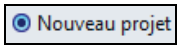


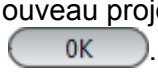
Le tableau suivant récapitule les caractéristiques géo-mécaniques disponibles :

Couche	Z_{toit} (m)	γ (kN/m^3)	E_M (MPa)	P_l* (MPa)	α	q_{sl} (kPa) (**)	E (MPa)(*)
Argiles sableuses	+0.00	20	5,0	0,6	0,67	30	15
Sables et graviers	-12.00	20	20	2,0	0,33	120	120

(*) E désigne le module de déformation élastique équivalent.
(**) q_{sl} désigne le frottement limite unitaire sol/pieu (pour un pieu foré).

F.4.2.1 Saisie des données

- Choisir de créer un nouveau projet en sélectionnant le radio-bouton 

;
- Cliquer sur le bouton 

.

Si Foxta est déjà ouvert, cliquer sur le menu "Fichier", "Nouveau projet".

Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011**

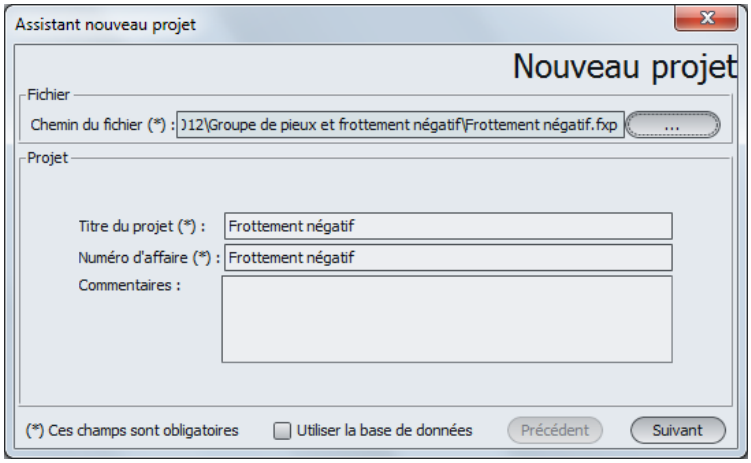
F.4.2.1.1 Assistant Nouveau projet

Cadre "Fichier" *:*

- renseigner le chemin du fichier en cliquant sur le bouton ... ;
- donner un nom au fichier et l'enregistrer.

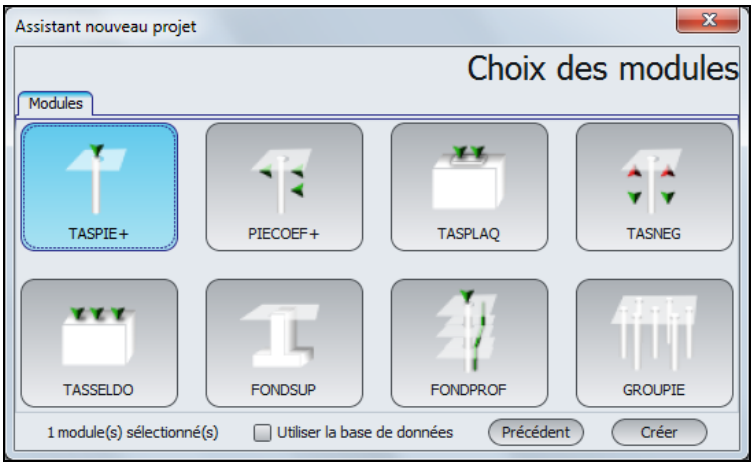
Cadre "Projet" :

- donner un titre au projet ;
- saisir un numéro d'affaire ;
- compléter avec un commentaire si besoin ;
- laisser la case "Utiliser la base de données" décochée (nous n'utiliserons pas la base de données pour cet exemple), et cliquer sur le bouton Suivant.



F.4.2.1.2 Assistant Nouveau projet : Choix du module

- Dans la fenêtre "Choix des modules", sélectionner le module Taspie+ puis cliquer sur le bouton Créer.

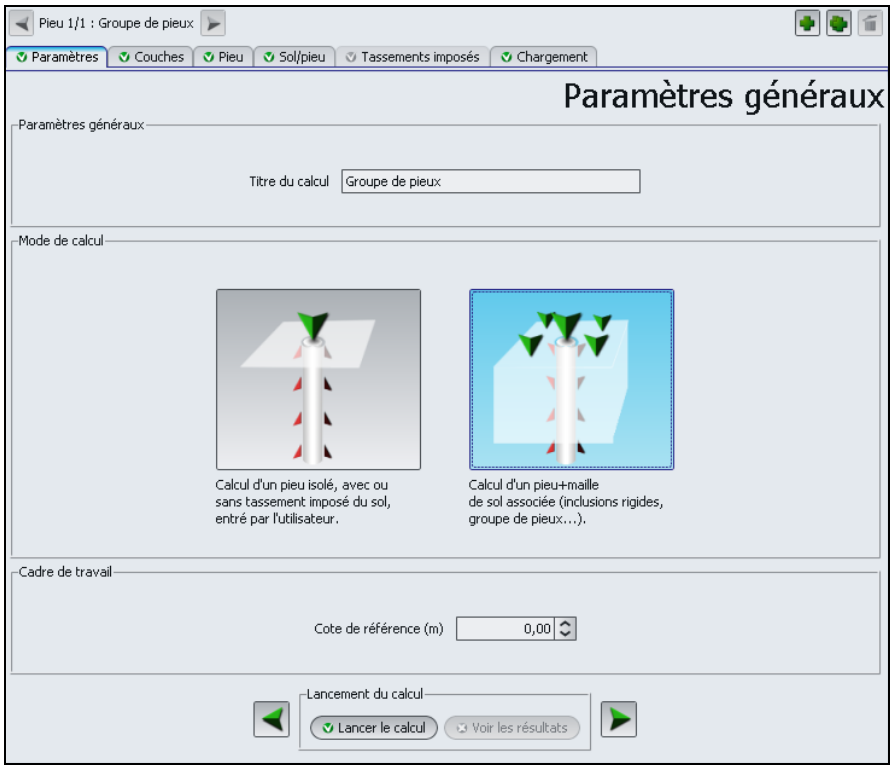


La fenêtre de saisie des données Taspie+ apparaît.

Il convient à présent de compléter les différents onglets de données, dans la zone droite de l'écran.

F.4.2.1.3 Onglet "Paramètres"

On choisit un calcul de type "Pieu + maille de sol associée". La cote de référence est fixée à 0.00 m.



Cadre "Paramètres généraux" :

- Titre du Calcul : "Groupe de pieux" par exemple.

Cadre "Mode ce calcul" :

- Sélectionner le "Calcul d'un pieu + maille de sol associée".

Cadre "Cadre de travail" :

- Cote de référence : 0,00 m.

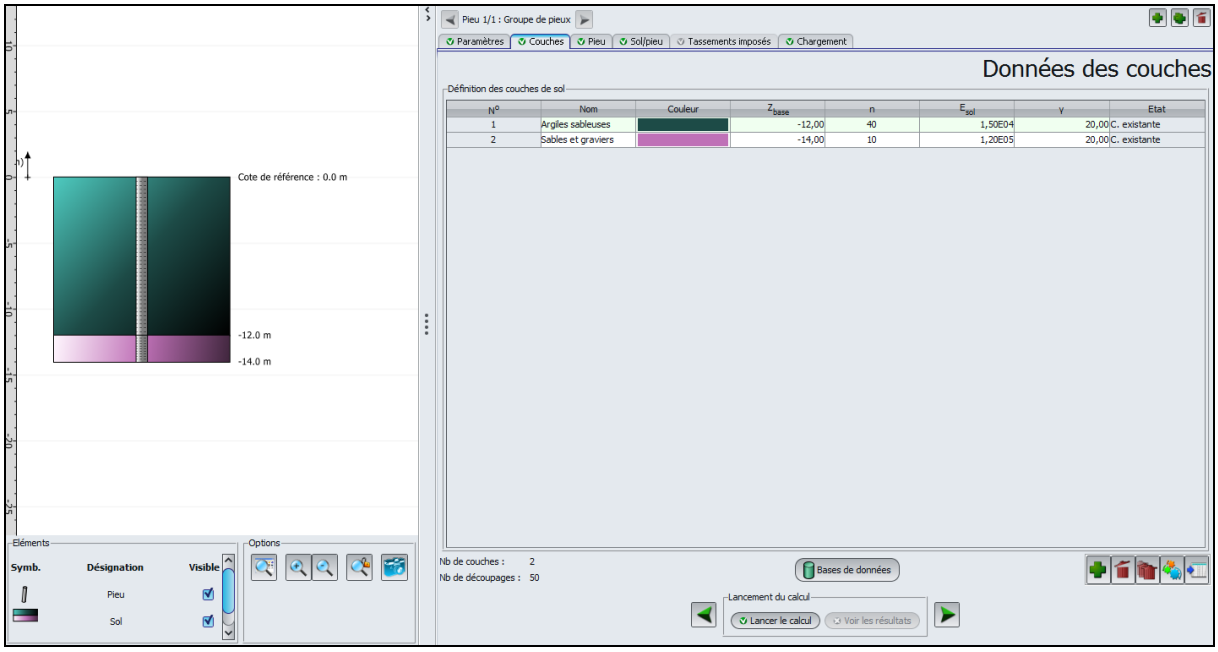
F.4.2.1.4 Onglet "Couches"

Créer deux couches de sol et entrer les paramètres correspondants sur la base de ceux fournis dans le tableau ci-dessous.

RAPPEL : par convention dans Taspie+, le modèle est arrêté à la base des pieux.

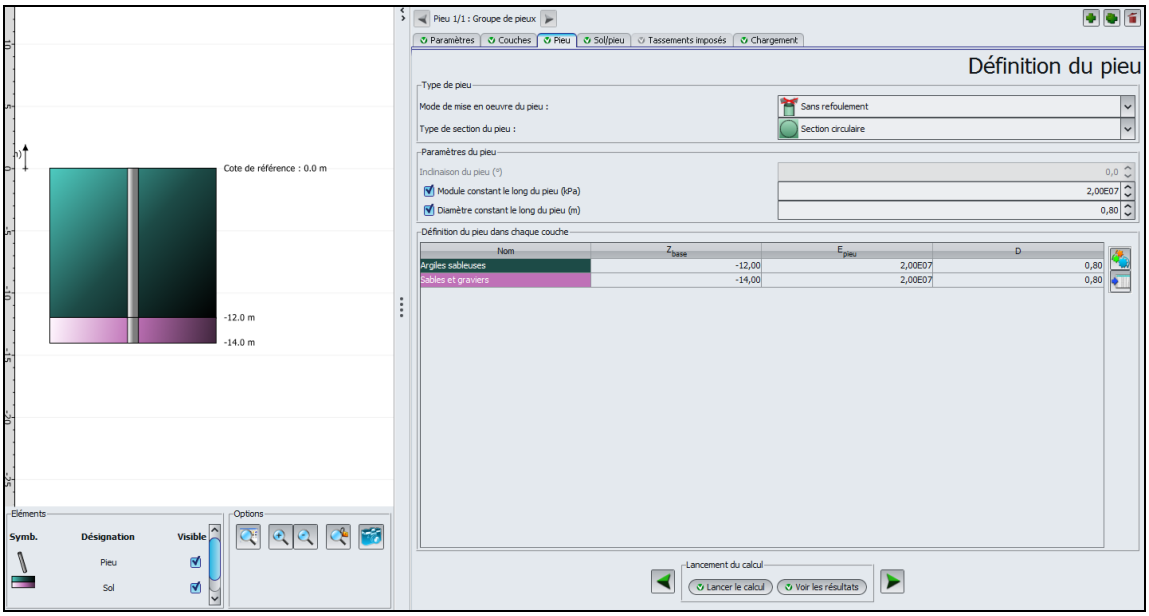
Nom	Z_{base} (m)	n	E_{sol} (kPa)	γ' (kN/m^3)	Etat
Argiles sableuses	-12.00	40	1.50E+04	20	Existante
Sables et Graviers	-14.00	10	1.20E+05	20	Existante

Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011**



F.4.2.1.5 Onglet "Pieu"

Les pieux sont mis en œuvre sans refoulement du sol en place. Ils sont circulaires et caractérisés par un diamètre constant de 80 cm et un module d'Young de 20 GPa.



Cadre "Type de pieu"

- mode de mise en œuvre : Sans refoulement ;
- type de section du pieu : Section circulaire.

Cadre "Paramètre du pieu"

- module constant le long du pieu : coché, E_{pieu} = 2,0E^{07} kPa ;
- diamètre constant le long du pieu : coché, D = 0,80 m.

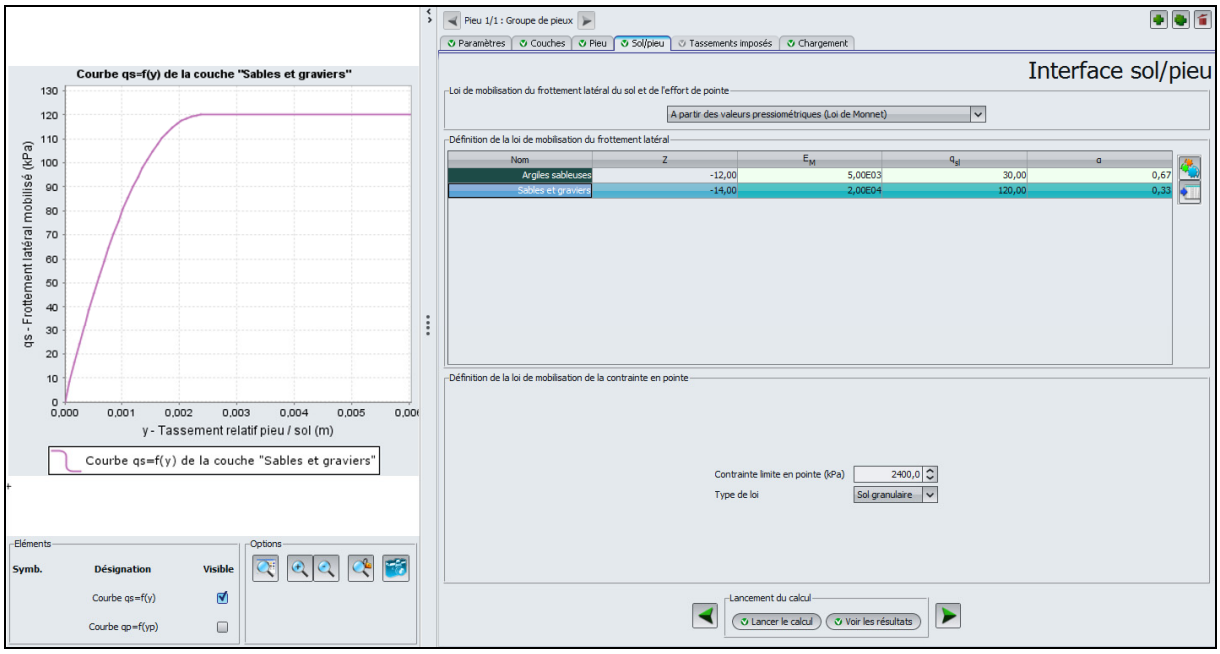
Cadre "Définition du pieu dans chaque couche" :

Les données du cadre "Définition du pieu dans chaque couche" sont déduites automatiquement, il n'y a rien à saisir.

F.4.2.1.6 Onglet "Sol/Pieu"

On choisit dans cet exemple de caractériser le frottement sol/pieu à l'aide d'une loi de mobilisation de type "Monnet". Il s'agit d'une loi "hyperbolique" construite à partir du module pressiométrique et du coefficient rhéologique.

La mobilisation de la contrainte en pointe suit une loi de type Frank et Zhao pour sol granulaire avec une contrainte limite prise égale à 1,2 x 2000 = 2400 kPa.



Cadre "Loi de mobilisation de frottement latéral du sol et de l'effort de pointe" :

- Choisir dans la liste déroulante : "A partir des valeurs pressiométriques (Loi de Monnet)".

Cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral" :

Saisir pour les différentes couches de sol :

- le module pressiométrique E_M (kPa) ;
- le frottement limite q_{sl} (kPa) ;
- le coefficient rhéologique α.

Nom	**E_M** (kPa)	**q_{sl}** (kPa)	α
Argiles sableuses	5,0E+03	30,0	0,67
Sables et graviers	2.0E+04	120,0	0,33

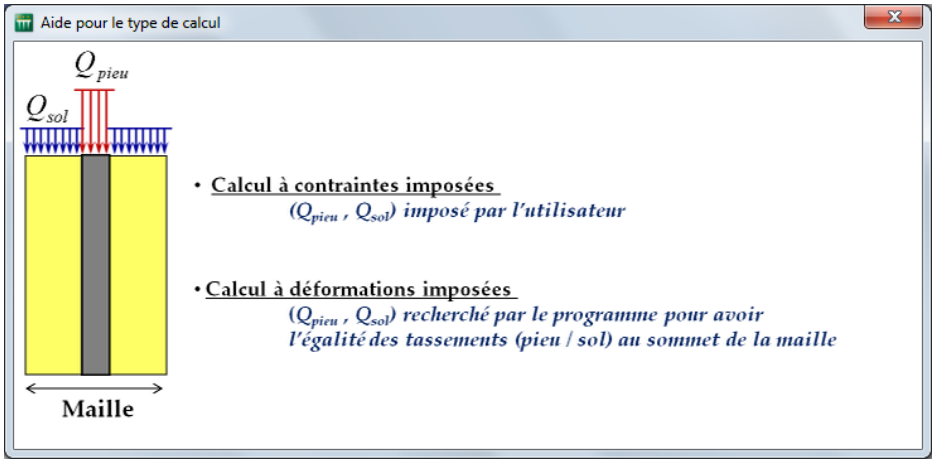
Cadre "Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe"

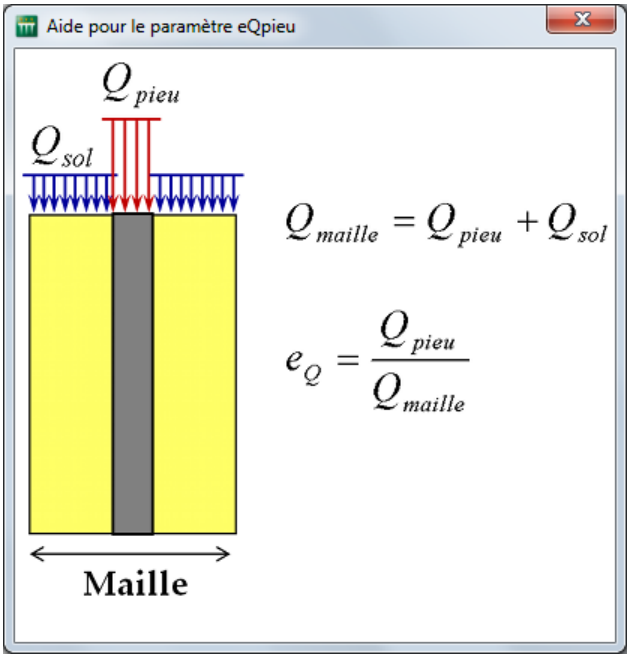
- contrainte limite en pointe : 2400 kPa ;
- type de loi : Sol granulaire.

F.4.2.1.7 Onglet "Chargement"

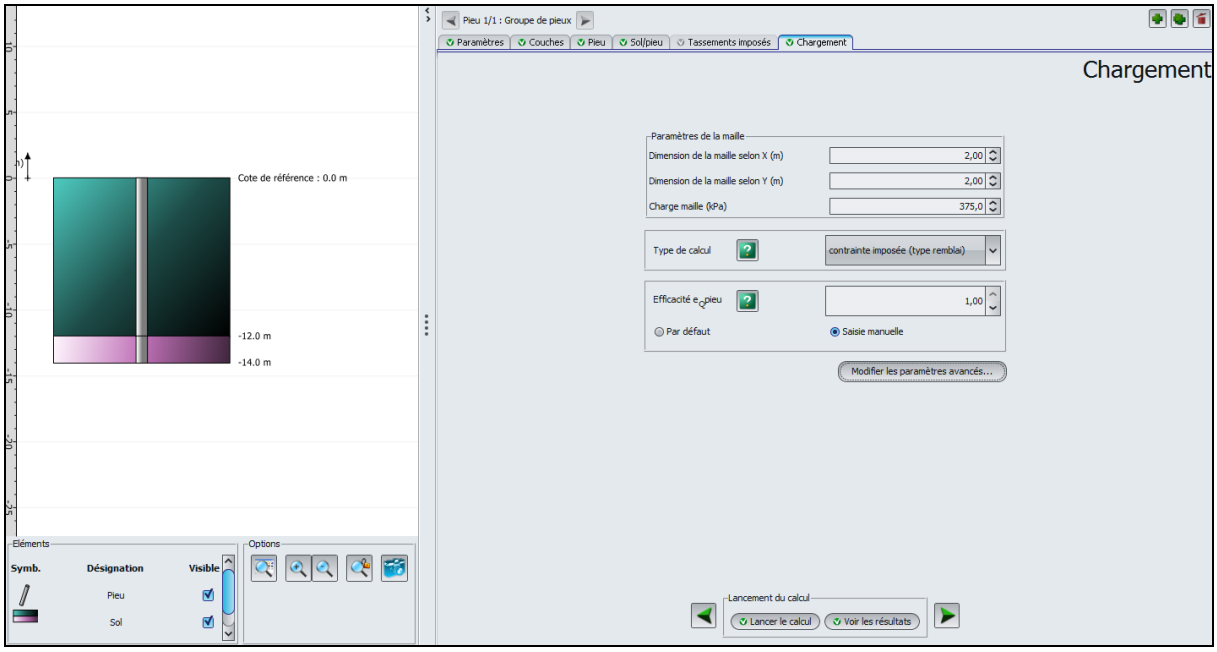
Cet onglet permet de définir le maillage des pieux ainsi que les paramètres de chargement en tête du modèle. Ces paramètres doivent être adaptés de manière à transmettre toute la charge en tête des pieux. Cela passe par un calcul à "contrainte imposée" en prenant $e_Q$pieu = 1.

Deux figures d'aide sont disponibles depuis cet onglet en cliquant sur les boutons et illustrent respectivement le choix du type de calcul et la définition du paramètre eQ_{pieu} :


Aide pour le type de calcul
Q_{pieu}
Q_{sol}
Maille
• Calcul à contraintes imposées
(Q_{pieu} , Q_{sol}) imposé par l'utilisateur
• Calcul à déformations imposées
(Q_{pieu} , Q_{sol}) recherché par le programme pour avoir
l'égalité des tassements (pieu / sol) au sommet de la maille



La charge appliquée en tête du modèle s'exprime en contrainte moyenne : soit ici 1500 kN/ (2 x 2) = 375 kPa.



Cadre "Paramètres de la maille" :

- Dimension de la maille selon X : 2,0 m ;
- Dimension de la maille selon Y : 2,0 m ;
- Charge maille : 375 kPa.

Cadre "Type de calcul" :

- Type de calcul : contrainte imposée (type remblai).

Cadre "Efficacité $e_Q$pieu" :

- Efficacité $e_Q$pieu : 1,00 (en saisie manuelle).

F.4.2.2 Calcul et Résultats

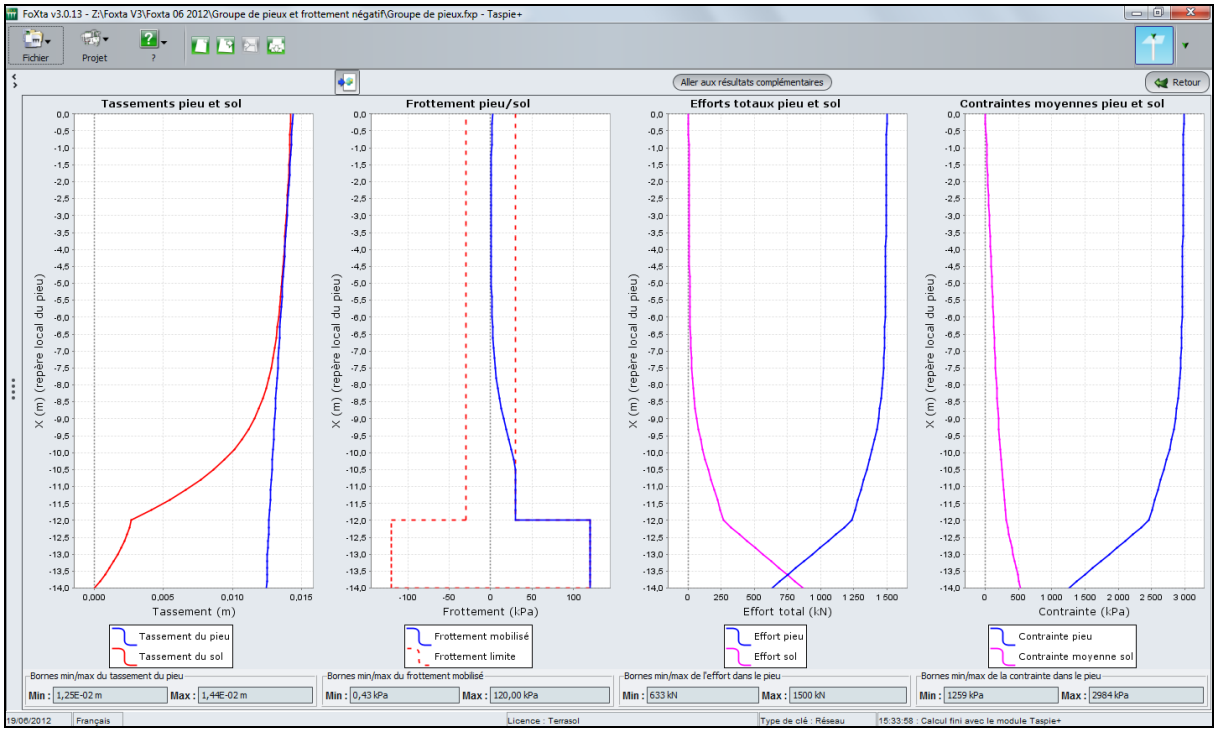
Un clic sur le bouton Lancer le calcul permet de lancer le calcul. Cliquer ensuite sur le bouton Voir les résultats pour accéder aux résultats.

Consulter ensuite directement les résultats graphiques principaux.

On note que le résultat graphique "Courbe de chargement" n'est pas disponible ici, car il n'est disponible que dans le cas d'un calcul de type "pieu isolé".

Les résultats obtenus appellent les commentaires suivants :

- le tassement maximal est de 1,44 cm et il est essentiellement attribué à l'enfoncement de la pointe du pieu ;
- le frottement sol/pieu est positif sur toute la hauteur des pieux mais n'est effectivement développé qu'à partir de 6 m de profondeur, cela s'explique par un effet d'entraînement significatif subi par le sol entre les pieux qui s'observe notamment par un tassement uniforme jusqu'à 6 m de profondeur ;
- l'absence de frottement négatif implique une contrainte dans le pieu maximale en tête.

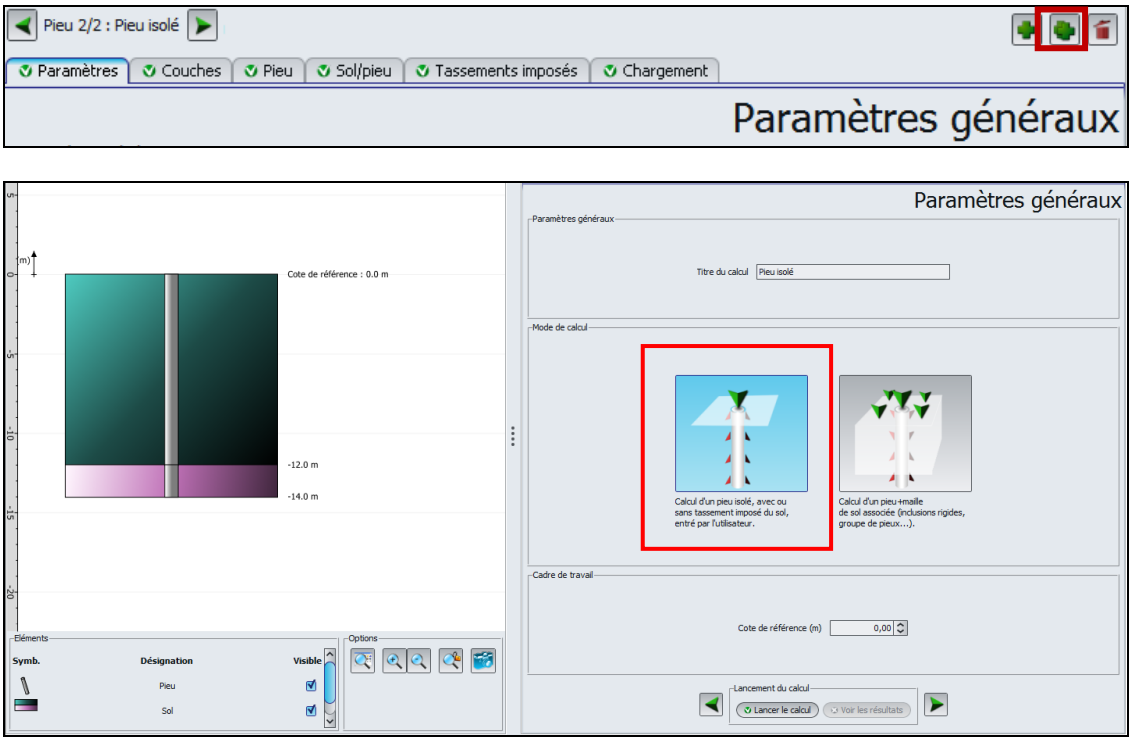


F.4.2.3 Comparaison à un pieu isolé

Il est intéressant de comparer le résultat précédent à celui qu'on aurait obtenu en considérant que les pieux se comportent comme un pieu isolé. Pour cela, retourner à la partie données en cliquant sur le bouton Retour, puis sur Retour aux données.

F.4.2.3.1 Onglet "Paramètres"

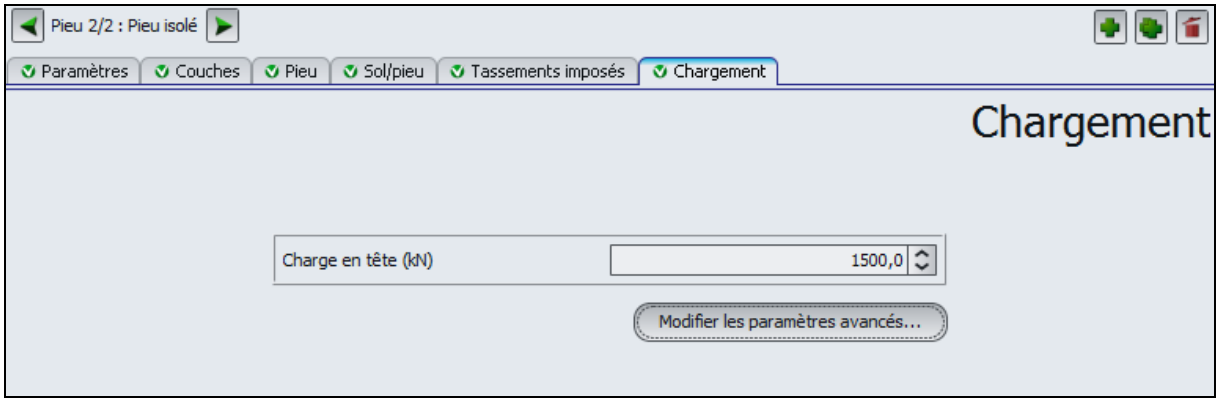
- dupliquer le "pieu en cours" en cliquant sur ;
- changer le titre en "Pieu isolé",
- changer le mode de calcul : "Calcul d'un pieu isolé".



F.4.2.3.2 Onglet "Chargement" :

- Renseigner la valeur de la charge appliquée en tête du pieu, soit 1500 kN.

Le reste des paramètres demeure inchangé.



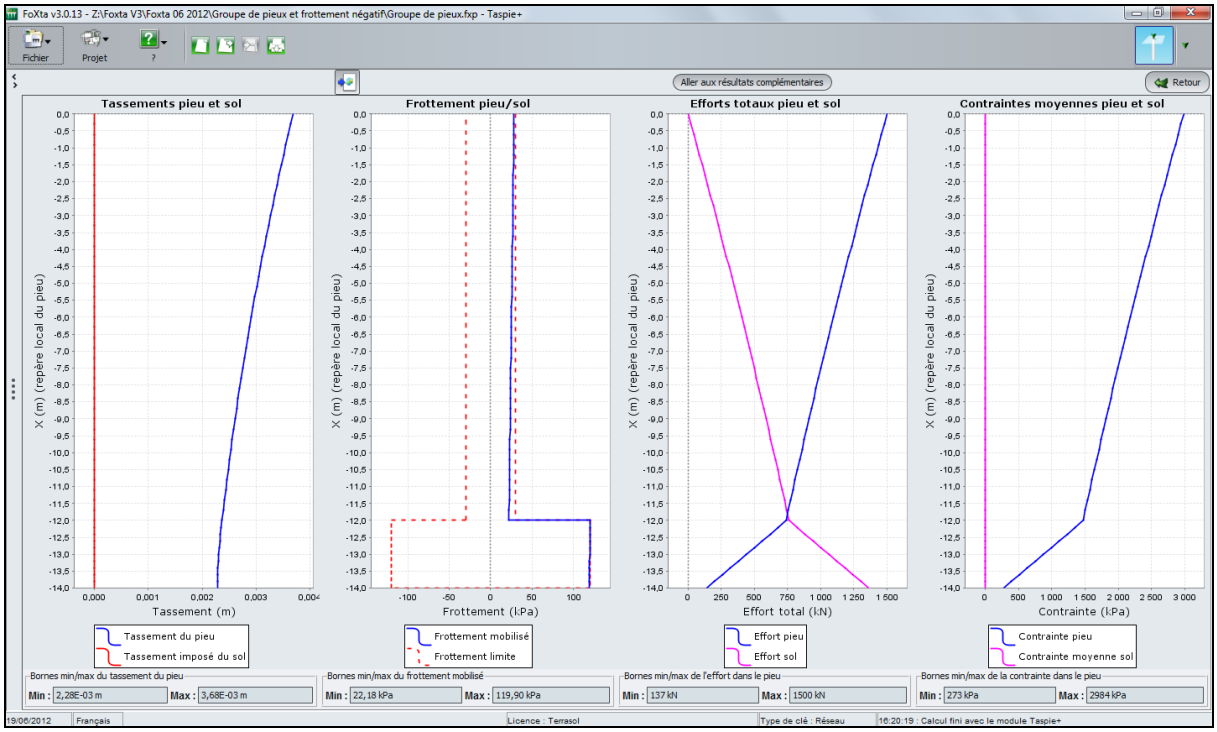
F.4.2.4 Calcul et Résultats

Relancer le calcul en cliquant sur Lancer le calcul puis sur Voir les résultats.

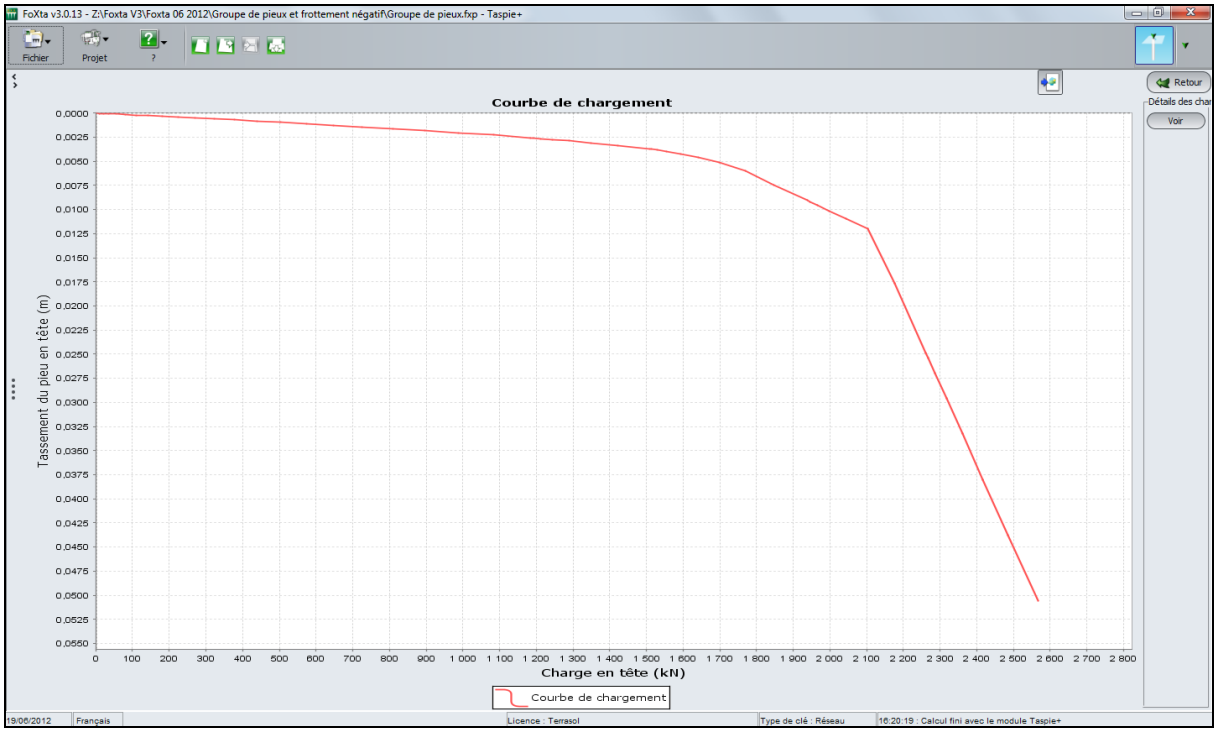
Consulter ensuite directement les résultats graphiques principaux.

Les résultats obtenus s'apparentent au comportement d'un pieu isolé avec un frottement positif développé depuis la tête du pieu et un tassement maximal de 4 mm environ.

L'hypothèse d'un pieu isolé conduit à un résultat optimiste avec un tassement 4 fois plus faible que celui obtenu en prenant en compte l'effet de groupe.

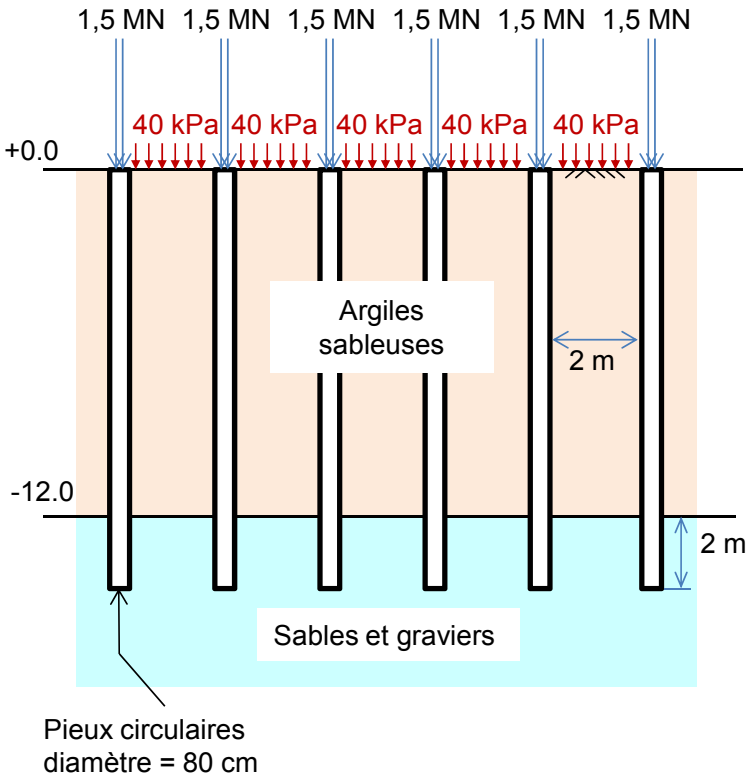


Notons que cette fois, s'agissant d'un calcul de type "pieu isolé", Taspie+ construit une courbe de chargement allant jusqu'à 95% de la charge de rupture. Celle-ci est accessible à l'aide du bouton "courbe de chargement" depuis la fenêtre de résultats.


FoXta v3.0.13 - Z:\Foxta V3\Foxta 06 2012\Groupe de pieux et frottement négatif\Groupe de pieux.fxp - Taspie+
Fichier
Projet
Courbe de chargement
Tassement du pieu en tête (m)
Charge en tête (kN)
Courbe de chargement
Retour
Voir

F.4.2.5 Influence du frottement négatif

On reprend les éléments du projet précédent, en simulant l'effet d'une surcharge de 40 kPa appliquée en surface du sol.



F.4.2.6 Saisie des données

Reprendre le projet précédent en dupliquant une nouvelle fois le pieu en cours :

- changer le titre en "frottement négatif" ;
- changer le mode de calcul en "pieu + maille de sol associée".

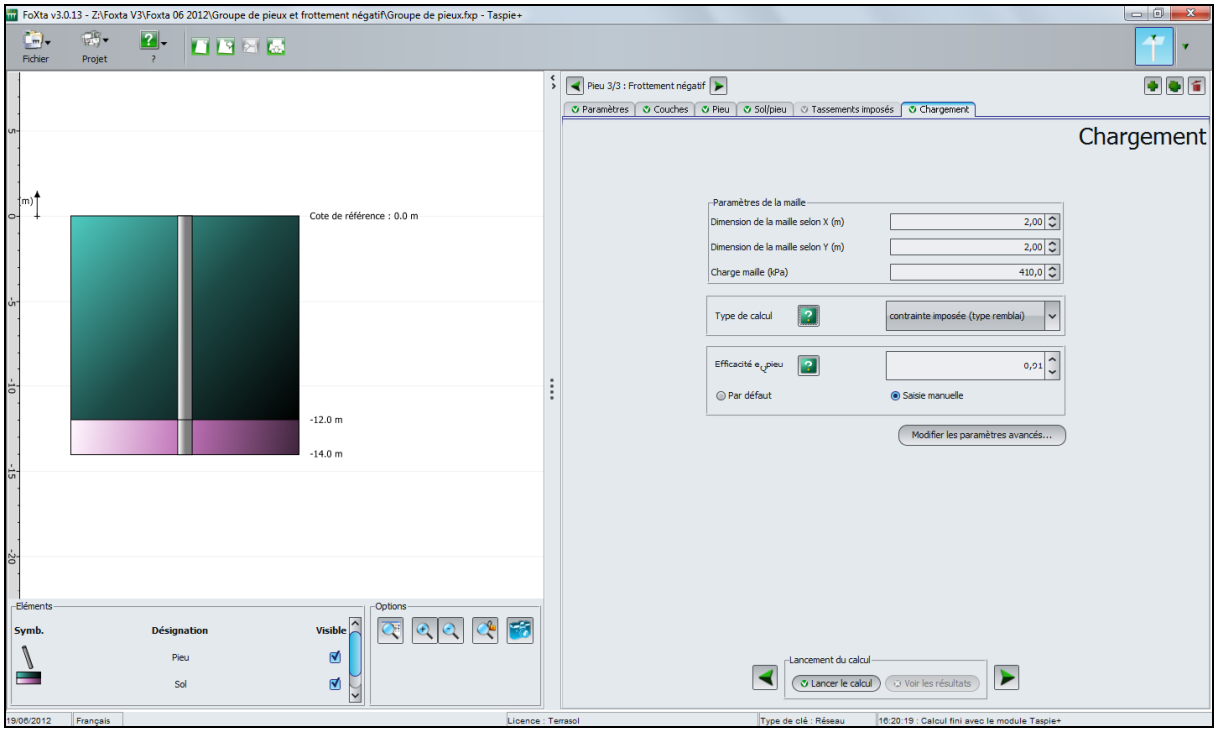
On vérifie au passage que FOXTA a bien récupéré l'ensemble des données définies dans la première partie. Aller ensuite directement à l'onglet "Chargement". Il convient à présent d'adapter les paramètres (q_{maille}, $e_Q$pieu) afin de modéliser les nouvelles conditions de chargement :

- La contrainte moyenne q_{maille} appliquée au sommet de la maille peut être calculée comme suit :

$$q_{maille} = (1500 + 40 \times (4 - \pi \times 0{,}4^2)) / 4 = 410 \text{ kPa}$$

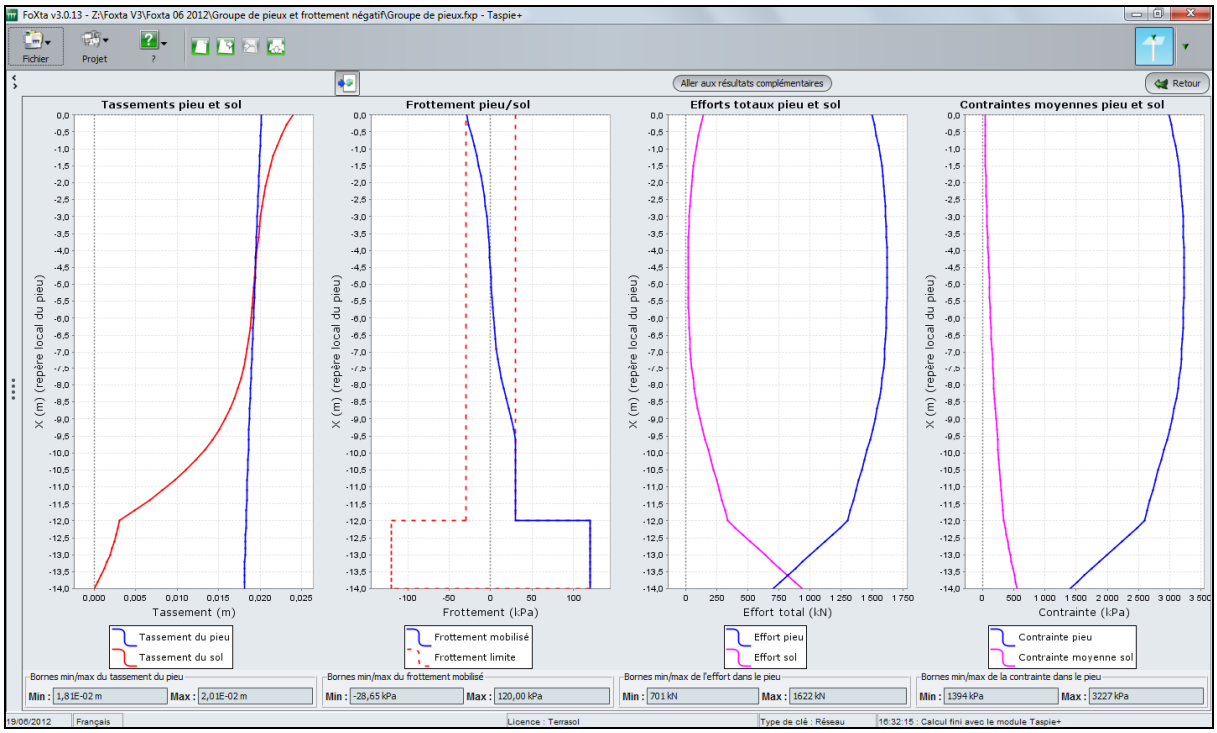
- Le paramètre de "$e_Q$pieu" s'obtient ensuite comme le rapport entre l'effort à transmettre au pieu (1500 kN) et la charge totale appliquée sur la maille, soit :

$$e_Q\text{pieu} = 1500 / (410 \times 4) = 0{,}914$$



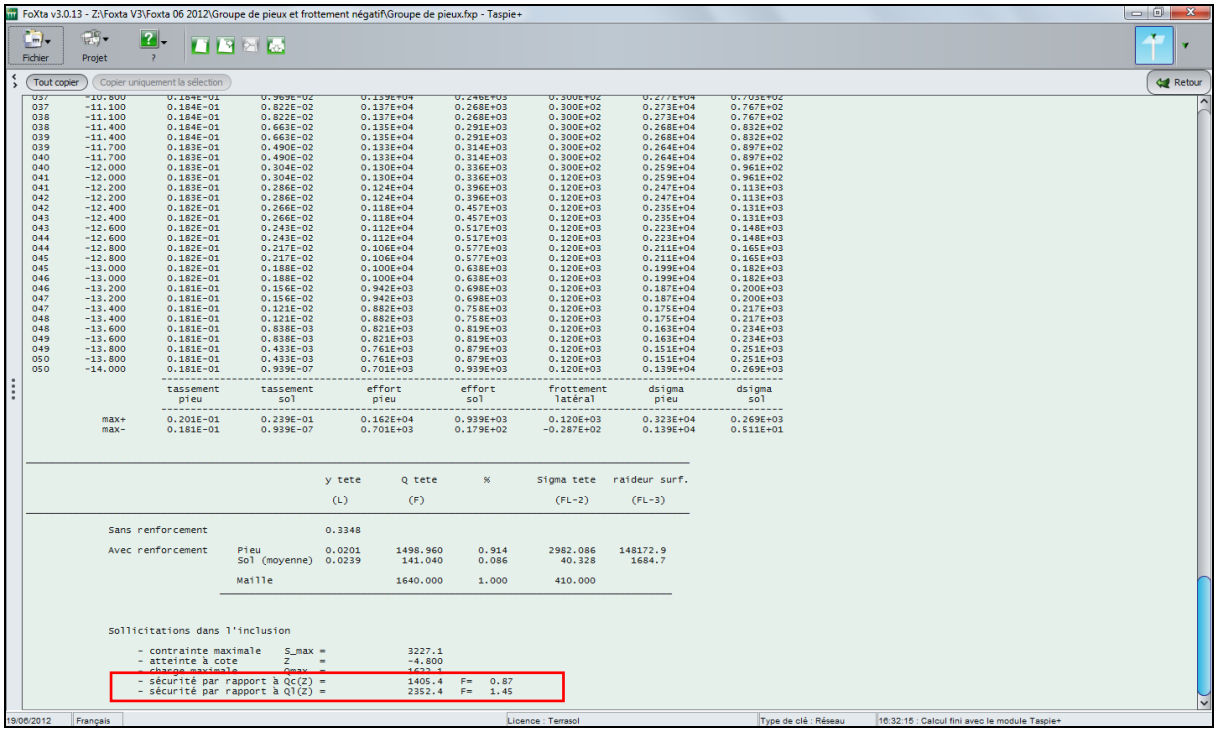
F.4.2.7 Résultats

Après avoir lancé le calcul, on aboutit aux résultats suivants :

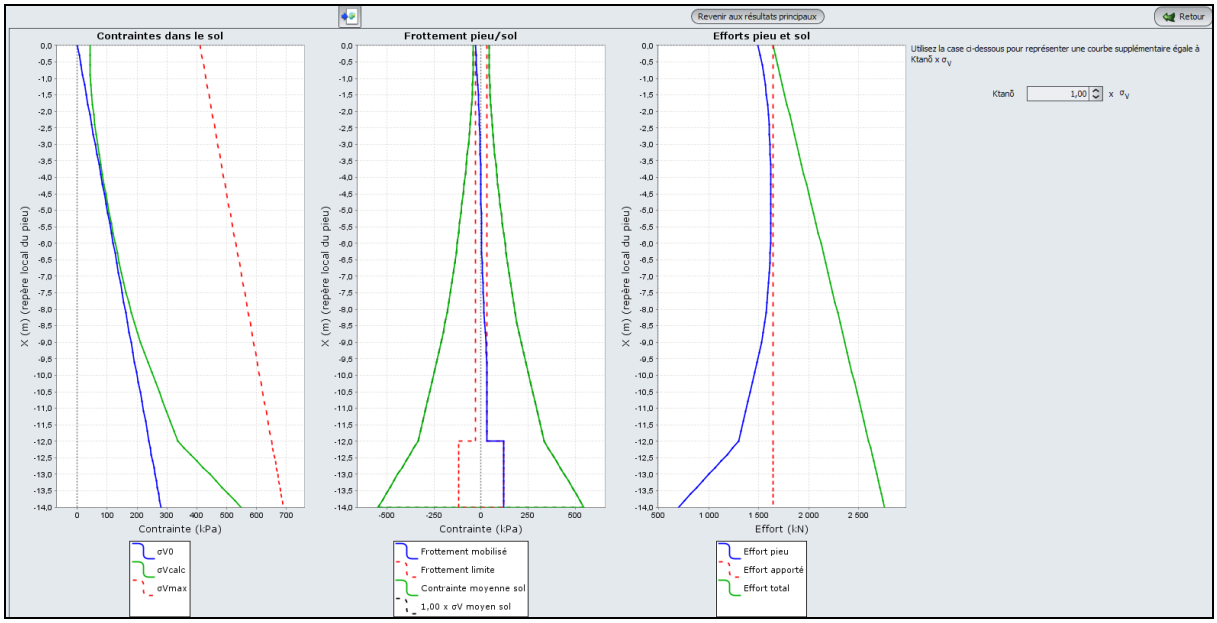


Les résultats ci-dessus font observer le développement d'un frottement négatif jusqu'à environ 5 m de profondeur où un plan d'égal tassement est obtenu. Le tassement du pieu se trouve augmenté de 0,5 cm par rapport au cas précédent.

La consultation du fichier de résultats formatés indique que la contrainte maximale dans les pieux est obtenue précisément à 4,8 m de profondeur et vaut 3,2 MPa, ce qui est acceptable. En revanche, la sécurité vis-à-vis de la charge critique de fluage est inférieure à 1 et n'est donc pas suffisante pour justifier la portance de la fondation aux ELS. Cela conduit à proposer un rallongement des pieux.


FoXta v3.0.13 - Z:\Foxta V3\Foxta 06 2012\Groupe de pieux et frottement négatif\Groupe de pieux.fxp - Taspie+
Fichier
Projet
Tout copier
Copier uniquement la sélection
Retour
tassement pieu
tassement sol
effort pieu
effort sol
frottement latéral
dsigma pieu
dsigma sol
max+ 0.201E-01 0.239E-01 0.162E+04 0.939E+03 0.120E+03 0.323E+04 0.269E+03
max- 0.181E-01 0.939E-07 0.701E+03 0.179E+02 -0.287E+02 0.139E+04 0.511E+01
y tete (L)
Q tete (F)
%
Sigma tete (FL-2)
raideur surf. (FL-3)
Sans renforcement 0.3348
Avec renforcement Pieu 0.0201 1498.960 0.914 2982.086 148172.9
Sol (moyenne) 0.0239 141.040 0.086 40.328 1684.7
Maille 1640.000 1.000 410.000
Sollicitations dans l'inclusion
- contrainte maximale S_max = 3227.1
- atteinte à cote Z = -4.800
- charge maximale Qmax = 1623.1
- sécurité par rapport à Qc(Z) = 1405.4 F= 0.87
- sécurité par rapport à Ql(Z) = 2352.4 F= 1.45
19/06/2012
Français
Licence : Terrasol
Type de clé : Réseau
16:32:15 : Calcul fini avec le module Taspie+

Il convient également de consulter les résultats graphiques complémentaires afin de juger de la compatibilité du frottement négatif développé en surface avec la contrainte verticale effective, en appliquant la valeur adéquate pour le paramètre ktanδ (voir les exemples 3 et 4).



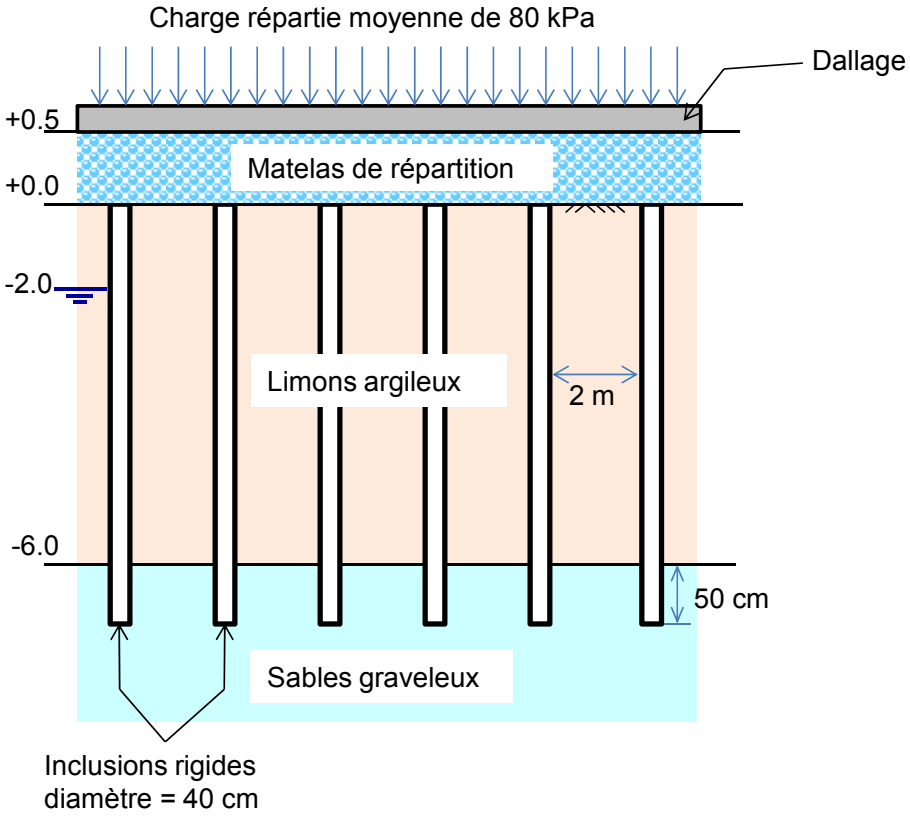
F.4.3. Exemple 3 : Dallage sur sol renforcé par inclusions rigides

Cet exemple traite du cas d'un massif renforcé par inclusions rigides. on s'intéresse ici à un renforcement par inclusions rigides sous un dallage fortement chargé.

Le traitement de cet exercice se base essentiellement sur le module Taspie+. Un passage complémentaire par TASPLAQ sera illustré pour l'évaluation des sollicitations "additionnelles" dans le dallage dues à la présence des inclusions.

F.4.3.1 Présentation du projet

Le projet étudié est illustré dans la figure ci-dessous.



La figure ci-dessus est complétée par les éléments suivants :

- le toit du TN naturel est pris à la cote +0.00. La nappe est à la cote -2.00 ;
- le dallage est mis en œuvre sur un matelas de répartition granulaire de 50 cm d'épaisseur ;
- les inclusions sont refoulantes et ancrées de 50 cm dans les sables graveleux (horizon porteur) ;
- les inclusions sont disposées sur un maillage régulier de 2,0 x 2,0 m ;
- le dallage a une épaisseur de 25 cm. La charge appliquée (80 kPa) correspond à un cas de chargement caractéristique et est supposée inclure le poids propre du dallage.

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des caractéristiques géomécaniques disponibles :

Couche	Z_{toit} (m)	γ (kN/m^3)	E_M (MPa)	P_l* (MPa)	q_{sl} (kPa) (**)	E (MPa)(*)
Matelas granulaire	+0,50	20	15	--	--	50
Limons argileux	+0,00	19	2,5	0,3	20	5
Sables graveleux	-6,00	20	20	2,0	80	80

(*) E désigne le module élastique de déformation verticale.
(**) q_{sl} désigne le frottement limite unitaire à l'interface sol/inclusion.

F.4.3.2 Saisie des données

Double cliquer sur l'icône Foxta pour lancer le programme, choisir le type de connexion et la langue souhaités puis cliquer sur le bouton OK.

A l'ouverture de l'application, Foxta propose :

- de créer un nouveau projet ;
- d'ouvrir un projet existant ;
- d'ouvrir automatiquement le dernier projet utilisé.

Dans le cas de cet exemple :

- choisir de créer un nouveau projet en sélectionnant le radio-bouton Nouveau projet ;
- cliquer sur le bouton OK.

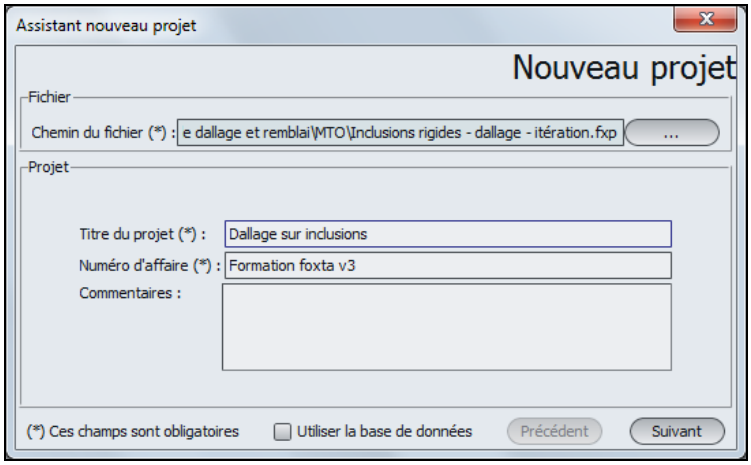
F.4.3.2.1 Assistant Nouveau projet

Cadre "Fichier"

- renseigner le chemin du projet en cliquant sur le bouton ... ;
- donner un nom au projet et l'enregistrer.

Cadre "Projet"

- donner un titre au projet ;
- saisir un numéro d'affaire ;
- compléter avec un commentaire si besoin ;
- laisser la case "Utiliser la base de données" décochée (nous n'utiliserons pas la base de données pour cet exemple), et cliquer sur le bouton Suivant.



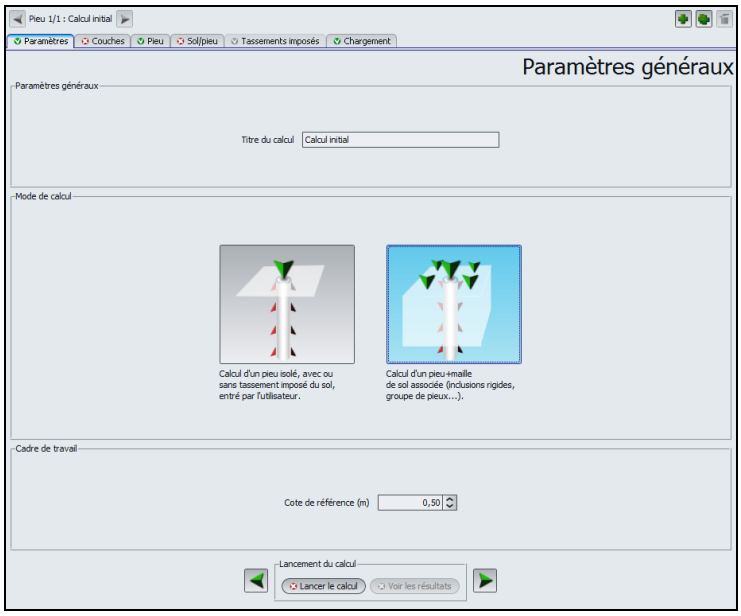
F.4.3.2.2 Assistant nouveau projet : Choix des modules

Sélectionner les modules Taspie+ et Tasplaq, puis cliquer sur le bouton Créer.

La fenêtre de saisie des données Taspie+ apparaît alors. Il convient de compléter les différents onglets par les données nécessaires au calcul.

F.4.3.2.3 Onglet "Paramètres"

Cet onglet concerne les paramètres généraux du calcul.



Cadre "Paramètres généraux"

- Indiquer le titre du calcul (par ex. calcul initial).

Cadre "Type de calcul"

- Sélectionner "Calcul d'un pieu + maille de sol associée".

Cadre "Cadre de travail"

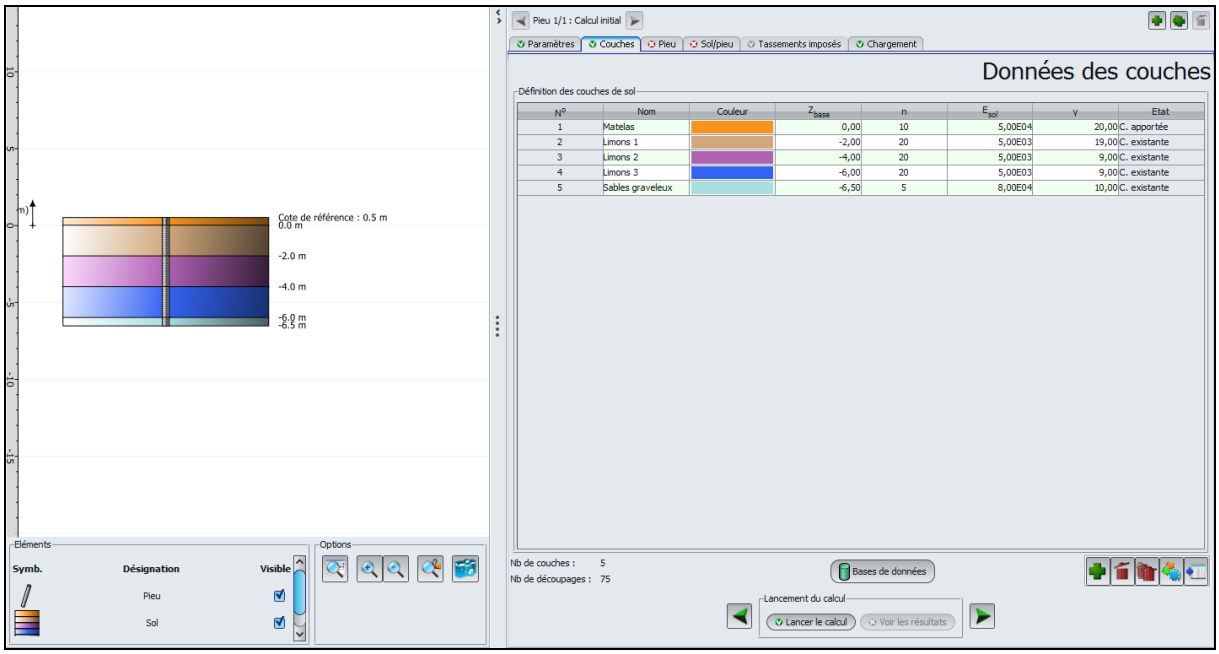
- Cote de référence : +0,50 m. En effet, la cote de référence correspond à la sous-face du dallage.

Pour passer à l'onglet suivant, cliquer soit sur le nom de l'onglet "Couches", soit sur le bouton .

F.4.3.2.4 Onglet "Couches"

Cet onglet concerne la définition des couches de sol. La couche de limons a été subdivisée en trois sous couches de 2 m d'épaisseur chacune afin d'affiner le choix de certains paramètres. Il est notamment nécessaire de définir une limite de couche à la cote -2 (cote de la nappe), de façon à pouvoir distinguer les valeurs du poids volumique de la couche de limons au-dessus et en-dessous de la nappe.

RAPPEL : par convention dans Taspie+ pour un pieu isolé, le modèle est arrêté à la base du pieu (par contre, dans certains cas "pieu + maille associée", il est parfois nécessaire de prolonger le modèle sous la pointe des pieux, voir aussi chapitre F.2.7).



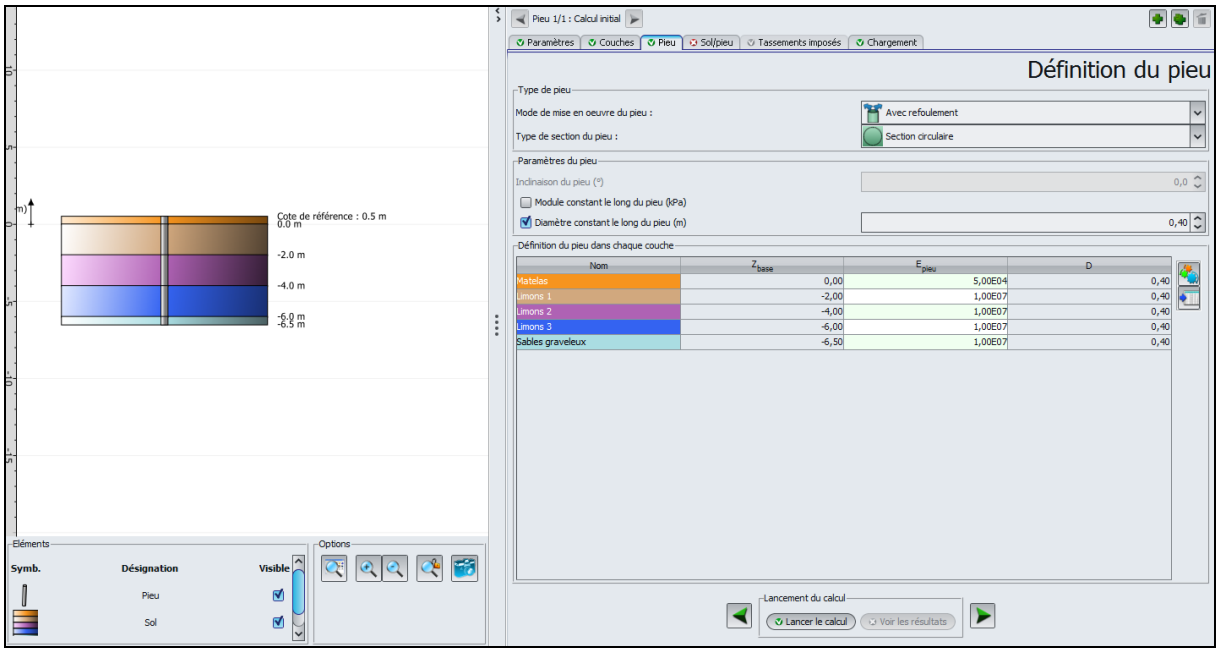
Utiliser le bouton sous le tableau pour créer chacune des couches.

Les paramètres à saisir sont récapitulés dans le tableau suivant :

Nom	**Z_{base}** (m)	**n**	**E_{sol} (kPa)**	**γ' (kN/m^3)**	**Etat**
Matelas	0.00	10	5.00E+04	20	Apportée
Limons 1	-2.00	20	5.00E+03	19	Existante
Limons 2	-4.00	20	5.00E+03	9	Existante
Limons 3	-6.00	20	5.00E+03	9	Existante
Sables	-6.50	5	8.00E+04	10	Existante

F.4.3.2.5 Onglet "Pieu"

Cet onglet concerne les caractéristiques du "domaine inclusion". Celui-ci est constitué par l'inclusion elle-même ainsi que le volume de sol qui la prolonge jusqu'à la tête du modèle.



Cadre "Type de pieu" :

- mode de mise en œuvre de pieu : avec refoulement ;
- type de section du pieu : Section circulaire.

Cadre "Paramètres du pieu" :

- inclinaison du pieu : 0° (non modifiable ici : il n'est possible de modifier ce paramètre que dans le cas d'un pieu isolé) ;
- module constant le long du pieu : décoché ;
- diamètre constant le long du pieu : coché, D = 0,4 m.

Cadre "Définition du pieu dans chaque couche" :

On complète par les valeurs des modules de déformation du "domaine pieu" dans chaque couche. Ceux-ci correspondent :

- au module du matelas (50 MPa) dans la première couche ;
- au module du béton constitutif de l'inclusion jusqu'à la base du modèle (10 000 MPa).

Nota : il est possible de cocher d'abord la case "Module constant le long du pieu", d'entrer une valeur de 10 000 MPa, puis de décocher ladite case et de ne modifier que la valeur de la première couche en 50 MPa.

F.4.3.2.6 Onglet "Sol/Pieu"

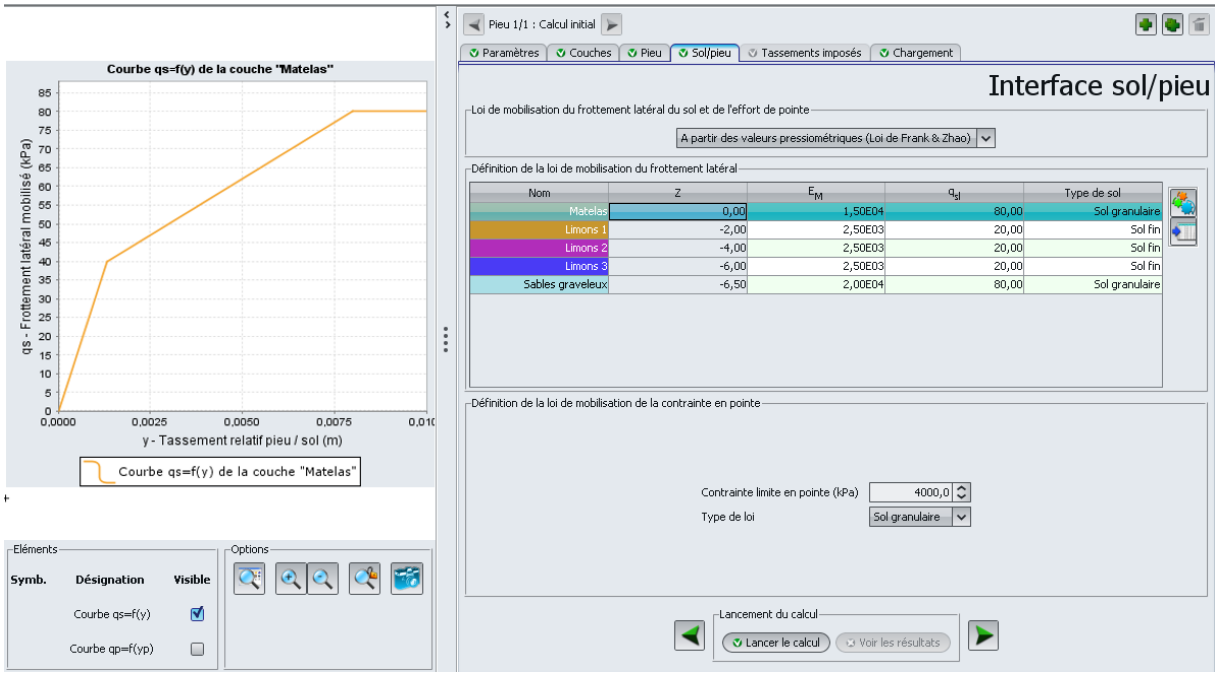
Cet onglet permet de définir les lois de mobilisation de frottement et l'effort en pointe.

La loi de mobilisation du frottement latéral utilisée ici est celle de Frank et Zhao construite à partir des valeurs pressiométriques. Le frottement latéral limite est pris égal à 20 kPa dans les limons et 80 kPa dans les sables graveleux. L'inclusion étant prolongée fictivement dans le matelas de répartition, le frottement latéral à définir dans cette couche s'apparente à celui d'un contact "sol / sol". On y admet une loi de type Frank et Zhao avec un plafonnement à $q_{sl} = k\tan\delta.\sigma_v'$, où σ_v' désigne la contrainte verticale effective dans la couche et $k\tan\delta = 1$. La

valeur de σ_v' est en toute rigueur un résultat et non pas une donnée du calcul. On prend, en première itération, σ_v' = 80 kPa, soit la charge moyenne appliquée sur le dallage.

La loi de mobilisation de la contrainte en pointe est celle de Frank et Zhao pour sol granulaire, avec une contrainte limite prise égale à q_{pl} = kp x pl* = 2,0 x 2000 = 4000 kPa.

Notons que ces lois proposées ne sont rigoureusement valables que pour un pieu foré. Leur application sur une inclusion mise en œuvre avec refoulement dans des sables et/ou graves constitue une approche pessimiste.


Courbe qs=f(y) de la couche "Matelas"
qs - Frottement latéral mobilisé (kPa)
y - Tassement relatif pieu / sol (m)
Courbe qs=f(y) de la couche "Matelas"
Eléments
Symb.
Désignation
Visible
Courbe qs=f(y)
Courbe qp=f(yp)
Options
Pieu 1/1 : Calcul initial
Paramètres
Couches
Pieu
Sol/pieu
Tassements imposés
Chargement
Interface sol/pieu
Loi de mobilisation du frottement latéral du sol et de l'effort de pointe
A partir des valeurs pressiométriques (Loi de Frank & Zhao)
Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral
Nom
Z
E_M
q_{sl}
Type de sol
Matelas 0,00 1,50E04 80,00 Sol granulaire
Limons 1 -2,00 2,50E03 20,00 Sol fin
Limons 2 -4,00 2,50E03 20,00 Sol fin
Limons 3 -6,00 2,50E03 20,00 Sol fin
Sables graveleux -6,50 2,00E04 80,00 Sol granulaire
Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe
Contrainte limite en pointe (kPa) 4000,0
Type de loi Sol granulaire
Lancement du calcul
Lancer le calcul
Voir les résultats

Cadre "Loi de mobilisation de frottement latéral du sol et de l'effort de pointe" :

- Choisir dans la liste déroulante : "A partir des valeurs pressiométriques (Loi de Frank & Zhao)". Il s'agit de la sélection par défaut.

Cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral" :

Saisir pour les différentes couches de sol :

- module pressiométrique E_M (kPa) ;
- frottement limite q_{sl} (kPa) ;
- type de sol.

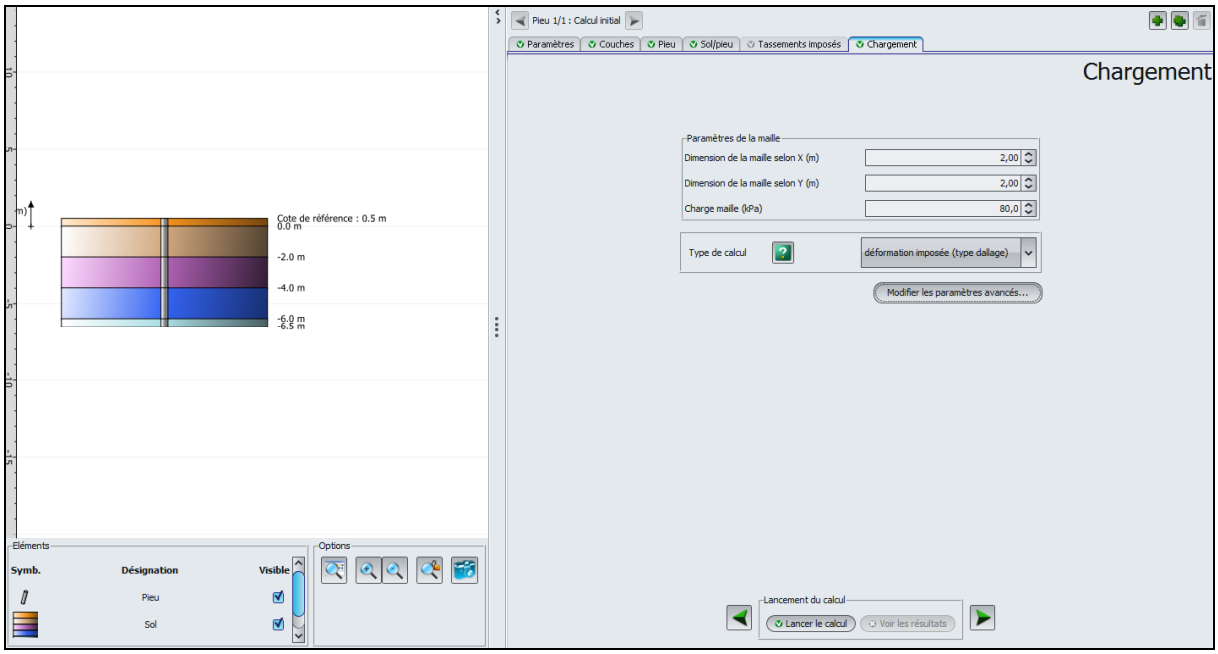
Nom	E_M	q_{sl}	Type de sol
Matelas	1,50E+04	80,0	Sol granulaire
Limons 1	2.50E+03	20,0	Sol fin
Limons 2	2.50E+03	20,0	Sol fin
Limons 3	2.50E+03	20,0	Sol fin
Sables	2,00E+04	80,0	Sol granulaire

Cadre "Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe" :

- Contrainte limite en pointe : 4000 kPa
- Type de loi : Sol granulaire.

F.4.3.2.7 Onglet "Chargement"

Cet onglet permet de définir le maillage des inclusions ainsi que les conditions de chargement en tête du modèle.



Cadre "Paramètres de la maille" :

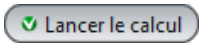
- dimension de la maille selon X : 2,0 m ;
- dimension de la maille selon Y : 2,0 m ;
- charge maille : 80 kPa. Il s'agit de la contrainte moyenne appliquée en tête du modèle.

Cadre "Type de calcul" :

- Type de calcul : déformation imposée (type dallage). En effet, on recherche ici la répartition des contraintes en tête du modèle (sous le dallage) entre les domaines "pieu" et "sol" de manière à avoir l'égalité des tassements en tête.
  On ne modifie pas ici les paramètres avancés (c'est-à-dire qu'on conserve les valeurs par défaut pour ces paramètres).

F.4.3.3 Calcul et Résultats

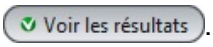
F.4.3.3.1 Calcul

Une fois que toutes les données sont correctement saisies, le bouton 

est alors actif, ce bouton étant accessible depuis tous les onglets.

Un clic sur ce bouton lancera le calcul.

F.4.3.3.2 Résultats

Pour accéder aux résultats sous forme de tableaux et de graphiques, cliquer sur le bouton 

.

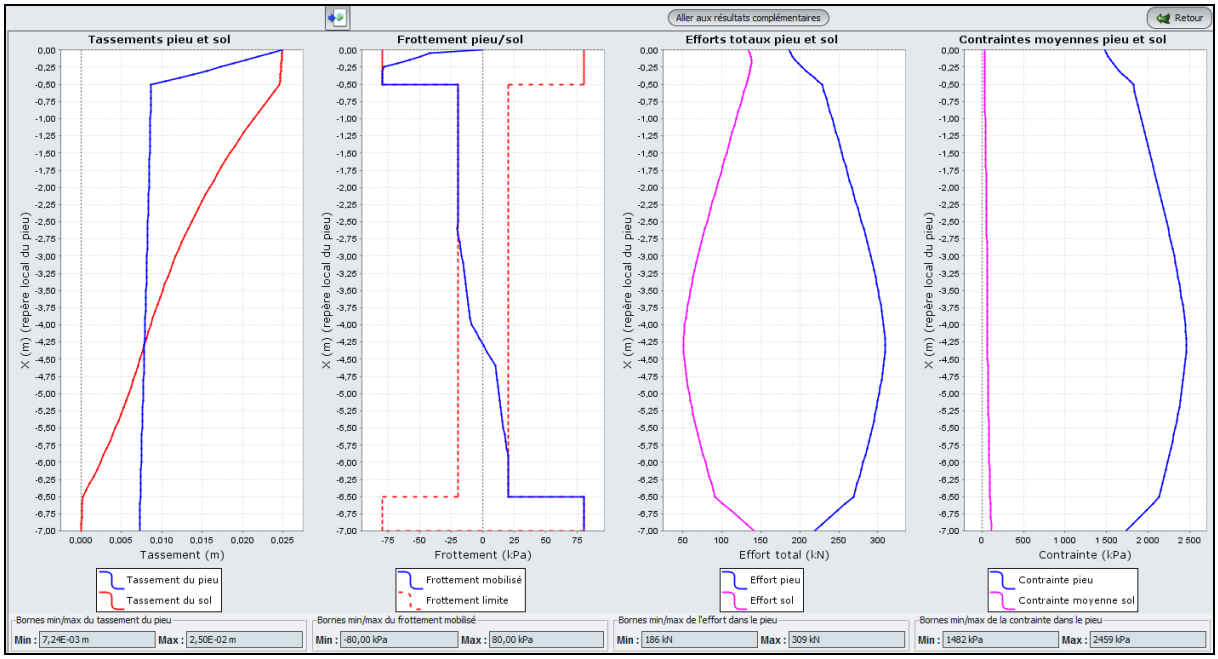
Cadre "Résultats graphiques" :

Cliquer sur le bouton "Résultats principaux". Cela permet d'accéder aux courbes de tassements, frottements, efforts et contraintes en profondeur, dans les domaines "pieu" et "sol".

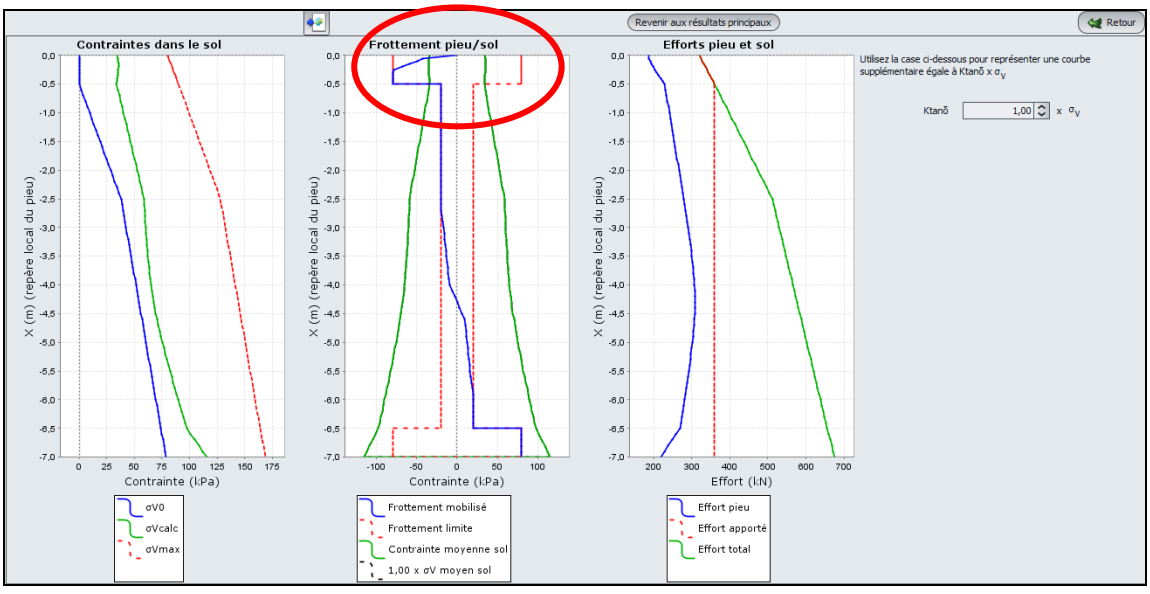
Le tassement maximal au droit du pieu est de 2,5 cm, dont plus de 1,5 cm sont obtenus dans l'épaisseur du matelas.

Les courbes de tassements illustrent la formation de deux plans d'égal tassement : le premier est obtenu par hypothèse en sous-face du dallage, et le second, dit point neutre, est obtenu à la cote -3.80 m (soit à la profondeur -4.30 m dans le repère local du pieu, utilisé pour l'affichage des courbes).

Au-dessus de ce point neutre, le frottement est négatif et le sol tasse plus que l'inclusion (accrochage). La position du point neutre marque également celle où la contrainte dans l'inclusion est maximale (environ 2,45 MPa).



Des résultats complémentaires sont également disponibles en cliquant sur le bouton Aller aux résultats complémentaires.



*Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011***

Le graphique central représente la superposition de la contrainte verticale effective dans le sol (entre les inclusions), du frottement mobilisé ainsi que du frottement limite. En particulier, on observe que la concentration des contraintes à l'aplomb de l'inclusion conduit à une contrainte verticale dans le sol en surface inférieure aux 80 kPa appliqués sur le dallage.

Toujours dans le matelas, on remarque que le cisaillement vertical mobilisé (courbe bleue) dépasse en valeur absolue la contrainte verticale effective (courbe verte), ce qui n'est pas acceptable mécaniquement (voir le chapitre F.4.3.2.6).

Il convient donc à présent de corriger la loi de frottement dans le matelas en prenant comme valeur limite la contrainte verticale effective obtenue à mi-hauteur du matelas soit environ 35 kPa.

F.4.3.4 Ajustement du frottement limite dans le matelas

Retourner aux données en cliquant sur Retour, puis sur Retour aux données.

F.4.3.4.1 Onglet "Sol/pieu"

- Modifier la valeur de "q_{sl}" affectée à la première couche en prenant 35 kPa.

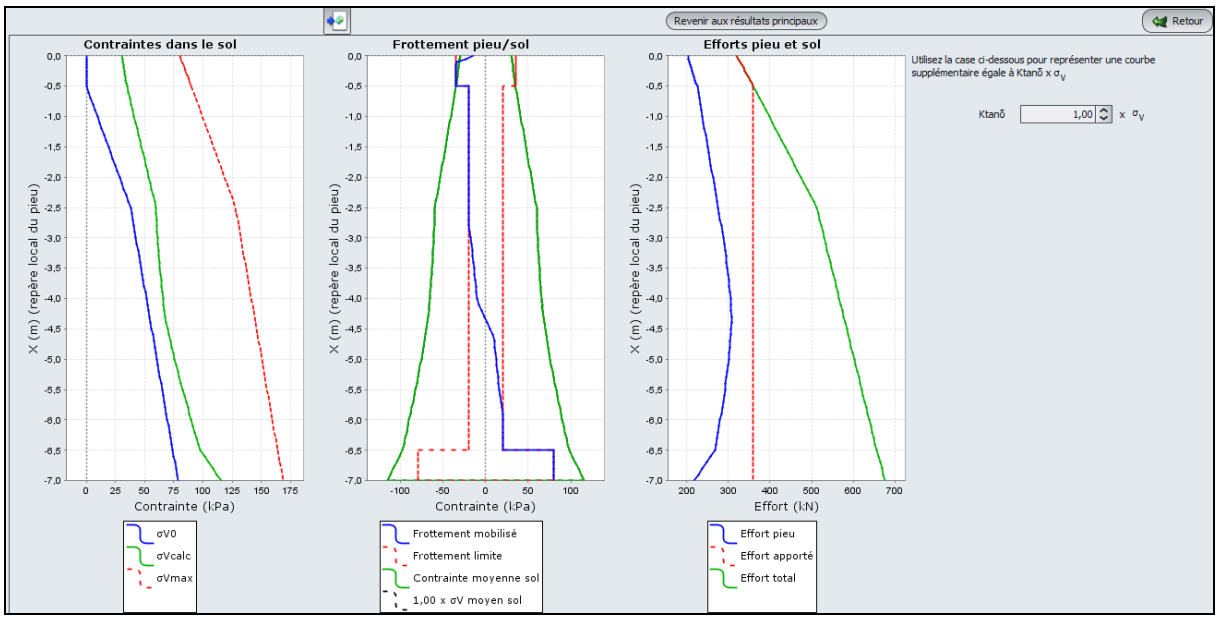
Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral

Nom	Z	E_M	q_{sl}	Type de sol
Matelas	0,00	1,50E04	35,00	Sol granulaire
Limons 1	-2,00	2,50E03	20,00	Sol fin
Limons 2	-4,00	2,50E03	20,00	Sol fin
Limons 3	-6,00	2,50E03	20,00	Sol fin
Sables graveleux	-6,50	2,00E04	80,00	Sol granulaire

F.4.3.4.2 Calcul

Relancer le calcul en cliquant sur Lancer le calcul puis sur Voir les résultats.

En consultant les résultats complémentaires, on vérifie que le frottement mobilisé dans le matelas est à présent bien limité à la contrainte verticale effective dans cette couche.

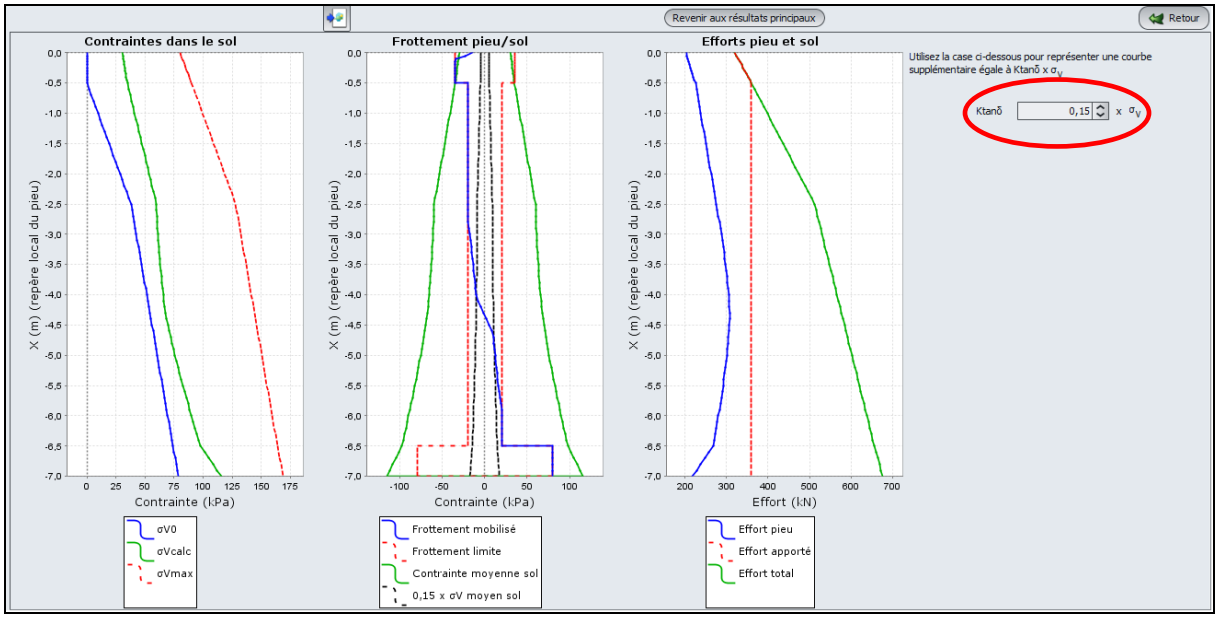


A présent, on s'intéresse au frottement mobilisé dans l'horizon compressible (limons). Ce frottement est négatif jusqu'à la cote -3.80 m et est plafonné en valeur absolue à 20 kPa conformément aux données du calcul. En toute rigueur, il convient là aussi de s'assurer que ce frottement négatif est compatible avec le niveau de contrainte verticale σ_v' en vérifiant qu'il reste inférieur, en valeur absolue, à ktanδ.σ_v', avec ktanδ = 0,15 ici (la valeur ktanδ doit être

choisie dans chaque cas en fonction du type de pieu, du mode de mise en place du pieu et du type de sol).

- Utiliser la case prévue à cet effet pour entrer une valeur de ktanδ = 0,15.

Cela fait apparaître une nouvelle courbe qui montre que la condition $|q_s| \leq ktan\delta.\sigma_v'$ n'est pas vérifiée. La limite du frottement négatif devra ainsi être ajustée dans les 4 premiers mètres des limons. Graphiquement, la limite à viser est de l'ordre de 7,5 kPa dans les deux premiers mètres puis de 10 kPa dans les deux suivants. Au-delà, le frottement est positif et il n'y a aucun ajustement à faire.



F.4.3.5 Ajustement du frottement limite dans les couches de limons 1 et 2

Retourner aux données en cliquant sur le bouton Retour, puis sur Retour aux données.

F.4.3.5.1 Onglet "Sol/pieu"

- Modifier la valeur de "q_{sl}" affectée aux limons 1 et 2 en prenant respectivement 7,5 et 10 kPa.

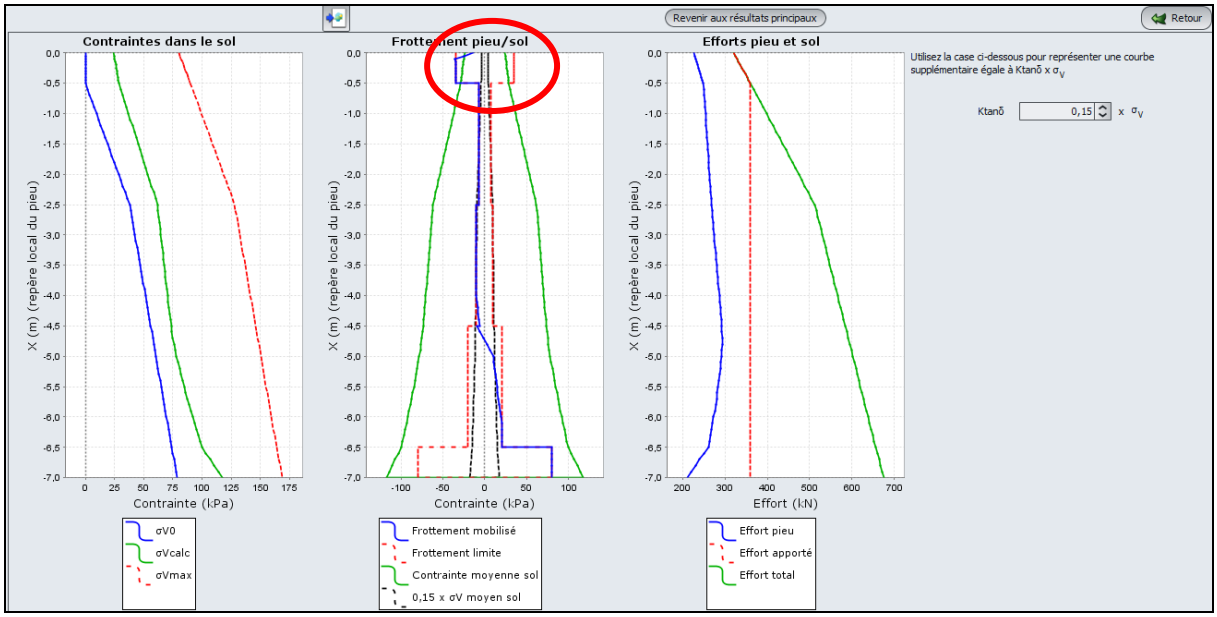
Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral

Nom	Z	E_M	q_{sl}	Type de sol
Matelas	0,00	1,50E04	35,00	Sol granulaire
Limons 1	-2,00	2,50E03	7,50	Sol fin
Limons 2	-4,00	2,50E03	10,00	Sol fin
Limons 3	-6,00	2,50E03	20,00	Sol fin
Sables graveleux	-6,50	2,00E04	80,00	Sol granulaire

F.4.3.6 Calcul et Résultats

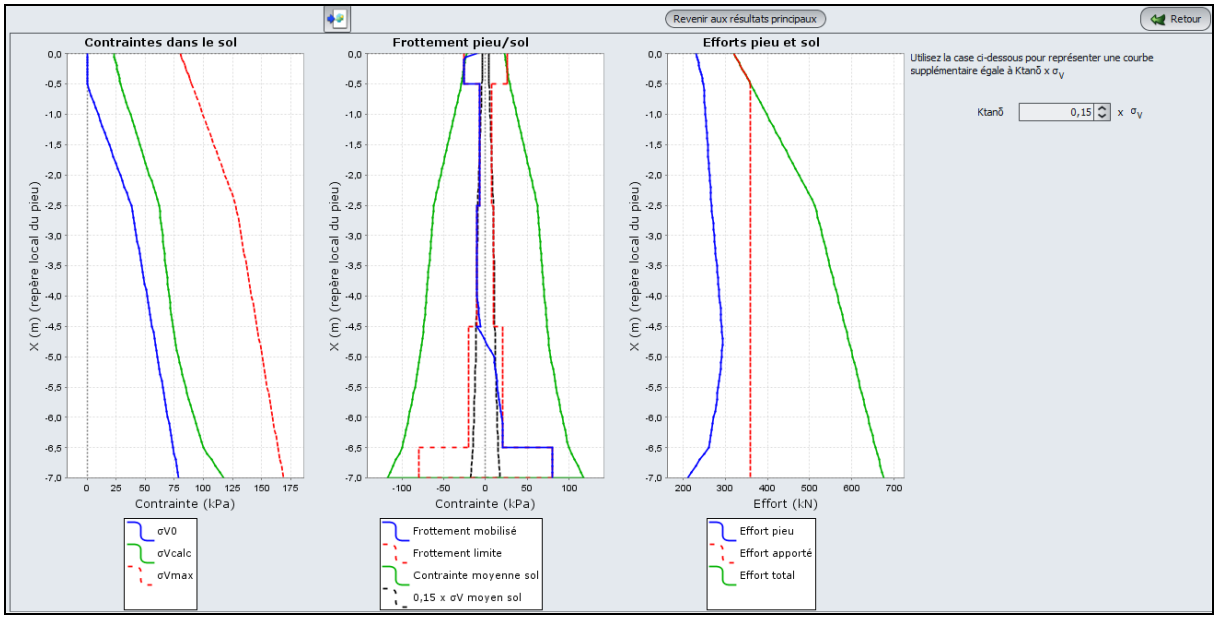
Relancer le calcul en cliquant sur Lancer le calcul puis sur Voir les résultats.

En consultant les résultats complémentaires, on vérifie que le frottement négatif mobilisé dans les limons est à présent compatible avec le niveau de contrainte verticale effective pour ktanδ = 0,15.

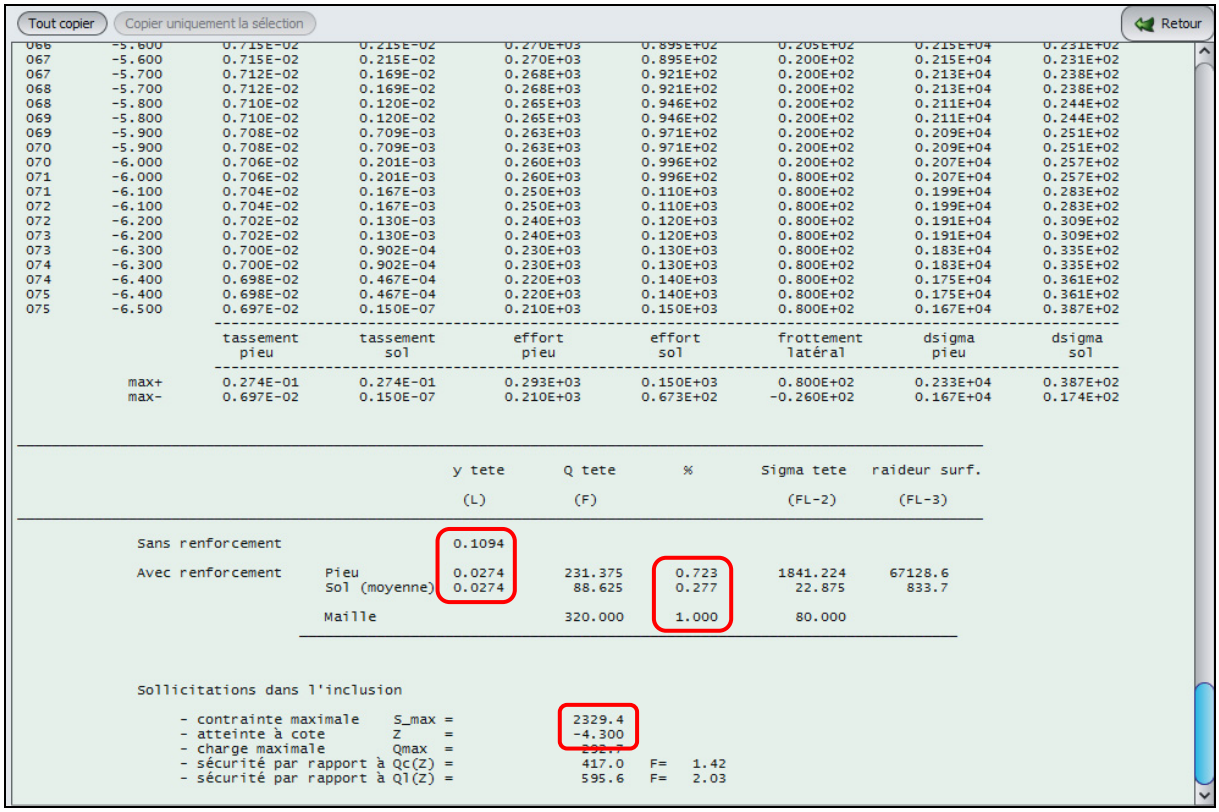


- On constate par ailleurs qu'il est également nécessaire de réajuster le frottement limite dans le matelas en passant à une valeur de 26 kPa (valeur de la contrainte verticale effective obtenue à mi hauteur du matelas).

Cette correction permet d'aboutir au résultat final représenté sur la figure suivante :



Retourner à la fenêtre de résultats et cliquer sur le bouton "Résultats formatés". Celui-ci présente en détail les données et résultats du calcul ainsi qu'un récapitulatif de quelques valeurs clés :



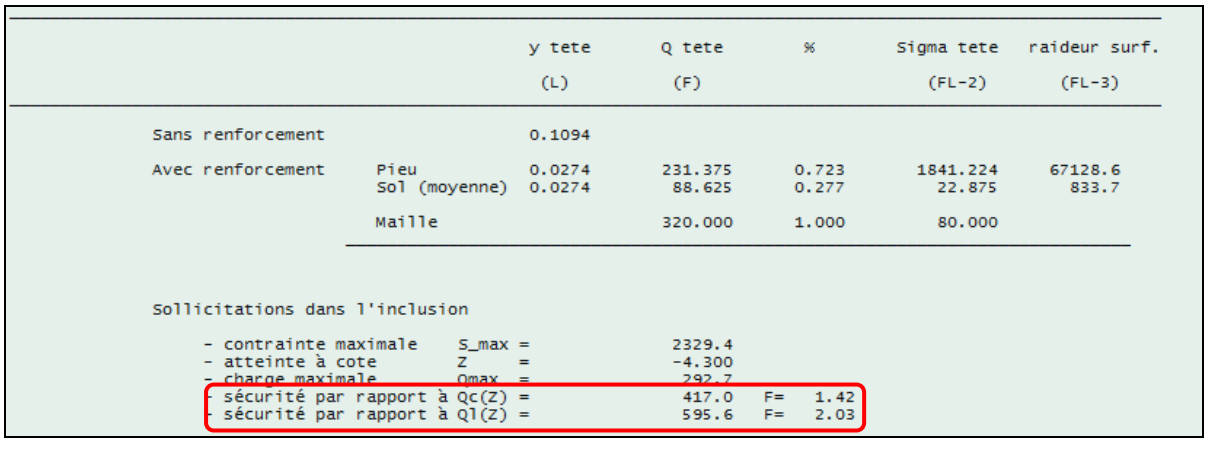
En particulier, Taspie+ donne à titre indicatif le tassement qui serait obtenu sans renforcement (valeur obtenue par une approche élastique unidimensionnelle) : celui-ci est de l'ordre de 11 cm. La mise en œuvre d'un renforcement par inclusions rigides a permis ici de réduire ce tassement d'un facteur 4 environ, avec un tassement maximal du massif renforcé de 2,7 cm.

Il est également intéressant de relever le taux de "concentration" des contraintes à l'aplomb de l'inclusion : l'effet "dallage" conduit à concentrer 72% de la charge totale au droit des inclusions.

La contrainte maximale dans l'inclusion est de 2,3 MPa et est atteinte à la cote –4.30 m.

F.4.3.7 Vérifications complémentaires - Portance des inclusions

Taspie+ évalue à la fin de chaque calcul la sécurité F disponible entre l'effort maximal dans l'inclusion et la charge critique de fluage calculée sous le plan de neutre. Ici, on a F = 1,42.

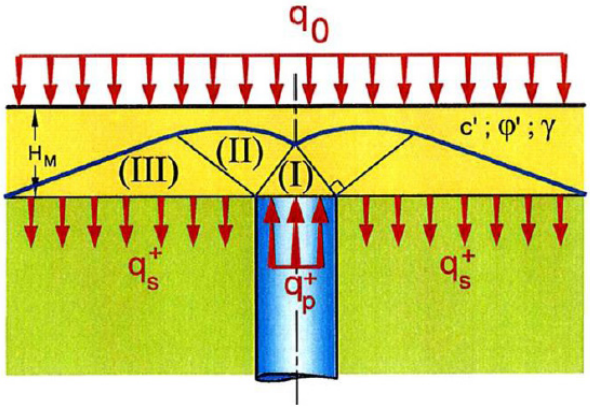

y tete (L)
Q tete (F)
%
Sigma tete (FL-2)
raideur surf. (FL-3)
Sans renforcement 0.1094
Avec renforcement Pieu 0.0274 231.375 0.723 1841.224 67128.6
Sol (moyenne) 0.0274 88.625 0.277 22.875 833.7
Maille 320.000 1.000 80.000
Sollicitations dans l'inclusion
- contrainte maximale S_max = 2329.4
- atteinte à cote Z = -4.300
- charge maximale Qmax = 292.7
- sécurité par rapport à Qc(Z) = 417.0 F= 1.42
- sécurité par rapport à Ql(Z) = 595.6 F= 2.03

En réalité, cette vérification n'est nécessaire que si les inclusions servent à assurer la stabilité de l'ouvrage : dans ce cas, la sécurité recherchée doit être d'au moins 1,1 en ELS caractéristiques et d'au moins 1,4 en combinaisons ELS quasi-permanentes (voir norme NF P 94 262). En revanche, dans le cas où les inclusions ne servent qu'en réduction de tassement, cette vérification n'est pas nécessaire.

F.4.3.8 Vérifications complémentaires - Poinçonnement du matelas

F.4.3.8.1 Calcul de la contrainte limite en tête de l'inclusion

Cette vérification consiste à établir, pour le chargement externe appliqué, une valeur limite de la contrainte en tête de l'inclusion compatible avec les caractéristiques du matériau constitutif du matelas. Cette valeur limite peut être calculée à partir du schéma de Prandtl :



Ce schéma permet ainsi d'exprimer la valeur limite de la contrainte en tête de l'inclusion comme suit :

$$q_p^+ = \frac{N_q}{1+\alpha\left(N_q-1\right)} q_0^*$$

Où :

- α : taux de "substitution" (rapport entre la section de l'inclusion et la surface de la maille) ;
- N_q : facteur dépendant de l'angle de frottement interne du matelas ;
- q_0^* : contrainte moyenne à la base du matelas : $q_0^* = q_0 + \gamma_{remblai}.h_{remblai}$.

Application numérique :
q_0^* = 90 kPa, α = 0,0314 et Nq = 48,9 pour un angle de frottement interne supposé de 38°.
On obtient : q_p^+ **= 1760 kPa.**

Cette valeur est à comparer à la contrainte effectivement appliquée en tête de l'inclusion issue du calcul Taspie+ (par exemple en consultant le fichier de résultats formatés du dernier calcul réalisé).

Elément	cote	tassement pieu	tassement sol	effort pieu	effort sol	frottement latéral	dsigma pieu	dsigma sol
001	0.500	0.274E-01	0.274E-01	0.231E+03	0.886E+02	-0.105E+02	0.184E+04	0.229E+02
001	0.450	0.256E-01	0.274E-01	0.233E+03	0.915E+02	-0.214E+02	0.185E+04	0.236E+02
002	0.450	0.256E-01	0.274E-01	0.233E+03	0.915E+02	-0.260E+02	0.185E+04	0.236E+02
002	0.400	0.237E-01	0.274E-01	0.234E+03	0.937E+02	-0.260E+02	0.186E+04	0.242E+02
003	0.400	0.237E-01	0.274E-01	0.234E+03	0.937E+02	-0.260E+02	0.186E+04	0.242E+02
003	0.350	0.219E-01	0.274E-01	0.236E+03	0.960E+02	-0.260E+02	0.188E+04	0.248E+02
004	0.350	0.219E-01	0.274E-01	0.236E+03	0.960E+02	-0.260E+02	0.188E+04	0.248E+02
004	0.300	0.200E-01	0.273E-01	0.238E+03	0.982E+02	-0.260E+02	0.189E+04	0.254E+02
005	0.300	0.200E-01	0.273E-01	0.238E+03	0.982E+02	-0.260E+02	0.189E+04	0.254E+02
005	0.250	0.181E-01	0.273E-01	0.240E+03	0.100E+03	-0.260E+02	0.191E+04	0.259E+02
006	0.250	0.181E-01	0.273E-01	0.240E+03	0.100E+03	-0.260E+02	0.191E+04	0.259E+02
006	0.200	0.162E-01	0.273E-01	0.241E+03	0.103E+03	-0.260E+02	0.192E+04	0.265E+02
007	0.200	0.162E-01	0.273E-01	0.241E+03	0.103E+03	-0.260E+02	0.192E+04	0.265E+02
007	0.150	0.142E-01	0.273E-01	0.243E+03	0.105E+03	-0.260E+02	0.193E+04	0.271E+02
008	0.150	0.142E-01	0.273E-01	0.243E+03	0.105E+03	-0.260E+02	0.193E+04	0.271E+02
008	0.100	0.123E-01	0.272E-01	0.245E+03	0.107E+03	-0.260E+02	0.195E+04	0.277E+02
009	0.100	0.123E-01	0.272E-01	0.245E+03	0.107E+03	-0.260E+02	0.195E+04	0.277E+02
009	0.050	0.103E-01	0.272E-01	0.247E+03	0.109E+03	-0.260E+02	0.196E+04	0.282E+02
010	0.050	0.103E-01	0.272E-01	0.247E+03	0.109E+03	-0.260E+02	0.196E+04	0.282E+02
010	0.000	0.836E-02	0.272E-01	0.248E+03	0.112E+03	-0.260E+02	0.198E+04	0.288E+02
011	0.000	0.836E-02	0.272E-01	0.248E+03	0.112E+03	-0.750E+01	0.198E+04	0.288E+02
011	-0.100	0.834E-02	0.266E-01	0.249E+03	0.111E+03	-0.750E+01	0.198E+04	0.286E+02
012	-0.100	0.834E-02	0.266E-01	0.249E+03	0.111E+03	-0.750E+01	0.198E+04	0.286E+02
012	-0.200	0.832E-02	0.260E-01	0.250E+03	0.110E+03	-0.750E+01	0.199E+04	0.283E+02
013	-0.200	0.832E-02	0.260E-01	0.250E+03	0.110E+03	-0.750E+01	0.199E+04	0.283E+02
013	-0.300	0.830E-02	0.255E-01	0.251E+03	0.109E+03	-0.750E+01	0.200E+04	0.281E+02
014	-0.300	0.830E-02	0.255E-01	0.251E+03	0.109E+03	-0.750E+01	0.200E+04	0.281E+02
014	-0.400	0.828E-02	0.249E-01	0.252E+03	0.108E+03	-0.750E+01	0.201E+04	0.278E+02
015	-0.400	0.828E-02	0.249E-01	0.252E+03	0.108E+03	-0.750E+01	0.201E+04	0.278E+02
015	-0.500	0.826E-02	0.244E-01	0.253E+03	0.107E+03	-0.750E+01	0.201E+04	0.276E+02
016	-0.500	0.826E-02	0.244E-01	0.253E+03	0.107E+03	-0.750E+01	0.201E+04	0.276E+02
016	-0.600	0.824E-02	0.238E-01	0.254E+03	0.106E+03	-0.750E+01	0.202E+04	0.274E+02
017	-0.600	0.824E-02	0.238E-01	0.254E+03	0.106E+03	-0.750E+01	0.202E+04	0.274E+02
017	-0.700	0.822E-02	0.233E-01	0.255E+03	0.105E+03	-0.750E+01	0.203E+04	0.271E+02
018	-0.700	0.822E-02	0.233E-01	0.255E+03	0.105E+03	-0.750E+01	0.203E+04	0.271E+02
018	-0.800	0.820E-02	0.227E-01	0.256E+03	0.104E+03	-0.750E+01	0.204E+04	0.269E+02
019	-0.800	0.820E-02	0.227E-01	0.256E+03	0.104E+03	-0.750E+01	0.204E+04	0.269E+02
019	-0.900	0.818E-02	0.222E-01	0.257E+03	0.103E+03	-0.750E+01	0.204E+04	0.266E+02
020	-0.900	0.818E-02	0.222E-01	0.257E+03	0.103E+03	-0.750E+01	0.204E+04	0.266E+02
020	-1.000	0.816E-02	0.217E-01	0.258E+03	0.102E+03	-0.750E+01	0.205E+04	0.264E+02
021	-1.000	0.816E-02	0.217E-01	0.258E+03	0.102E+03	-0.750E+01	0.205E+04	0.264E+02
021	-1.100	0.814E-02	0.211E-01	0.259E+03	0.101E+03	-0.750E+01	0.206E+04	0.261E+02

La contrainte appliquée en tête de l'inclusion est de 1980 kPa, et est supérieure à la limite calculée par le schéma de Prandtl. Cela signifie qu'il y a poinçonnement de l'inclusion dans le matelas par déformations plastiques.

Il est possible de simuler cette "plastification" du matelas au droit de l'inclusion en dégradant son module de déformation (dans le domaine "inclusion") de manière à réduire la contrainte en tête de l'inclusion à 1760 kPa.

F.4.3.8.2 Simulation de la plastification du matelas

Revenir au mode de saisie des données.

Onglet "Pieu" :

- Modifier le module du pieu dans la première couche (matelas) : remplacer la valeur de 50 MPa par 30 MPa.

Définition du pieu dans chaque couche

Nom	Z_{base}	E_{pieu}	D
Matelas	0,00	3,00E04	0,40
Limons 1	-2,00	1,00E07	0,40
Limons 2	-4,00	1,00E07	0,40
Limons 3	-6,00	1,00E07	0,40
Sables graveleux	-6,50	1,00E07	0,40

*Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011***

F.4.3.8.3 Calcul et Résultats

Relancer les calculs et vérifier que la contrainte appliquée en tête de l'inclusion est de 1740 kPa et est donc compatible avec la limite de Prandtl. On remarquera au passage que cette "plastification" a généré environ 1 cm de tassement supplémentaire en tête (tassement total de 3,6 cm).

Elément	cote	tassement pieu	tassement sol	effort pieu	effort sol	frottement latéral	dsigma pieu	dsigma sol
001	0.500	0.356E-01	0.356E-01	0.201E+03	0.119E+03	-0.105E+02	0.160E+04	0.307E+02
001	0.450	0.329E-01	0.356E-01	0.202E+03	0.122E+03	-0.264E+02	0.161E+04	0.314E+02
002	0.450	0.329E-01	0.356E-01	0.202E+03	0.122E+03	-0.260E+02	0.161E+04	0.314E+02
002	0.400	0.302E-01	0.355E-01	0.204E+03	0.124E+03	-0.260E+02	0.162E+04	0.320E+02
003	0.400	0.302E-01	0.355E-01	0.204E+03	0.124E+03	-0.260E+02	0.162E+04	0.320E+02
003	0.350	0.275E-01	0.355E-01	0.206E+03	0.126E+03	-0.260E+02	0.164E+04	0.326E+02
004	0.350	0.275E-01	0.355E-01	0.206E+03	0.126E+03	-0.260E+02	0.164E+04	0.326E+02
004	0.300	0.247E-01	0.355E-01	0.208E+03	0.128E+03	-0.260E+02	0.165E+04	0.332E+02
005	0.300	0.247E-01	0.355E-01	0.208E+03	0.128E+03	-0.260E+02	0.165E+04	0.332E+02
005	0.250	0.220E-01	0.354E-01	0.209E+03	0.131E+03	-0.260E+02	0.167E+04	0.337E+02
006	0.250	0.220E-01	0.354E-01	0.209E+03	0.131E+03	-0.260E+02	0.167E+04	0.337E+02
006	0.200	0.192E-01	0.354E-01	0.211E+03	0.133E+03	-0.260E+02	0.168E+04	0.343E+02
007	0.200	0.192E-01	0.354E-01	0.211E+03	0.133E+03	-0.260E+02	0.168E+04	0.343E+02
007	0.150	0.164E-01	0.354E-01	0.213E+03	0.135E+03	-0.260E+02	0.169E+04	0.349E+02
008	0.150	0.164E-01	0.354E-01	0.213E+03	0.135E+03	-0.260E+02	0.169E+04	0.349E+02
008	0.100	0.135E-01	0.353E-01	0.215E+03	0.137E+03	-0.260E+02	0.171E+04	0.355E+02
009	0.100	0.135E-01	0.353E-01	0.215E+03	0.137E+03	-0.260E+02	0.171E+04	0.355E+02
009	0.050	0.107E-01	0.353E-01	0.216E+03	0.140E+03	-0.260E+02	0.172E+04	0.360E+02
010	0.050	0.107E-01	0.353E-01	0.216E+03	0.140E+03	-0.260E+02	0.172E+04	0.360E+02
010	0.000	0.780E-02	0.352E-01	0.218E+03	0.142E+03	-0.260E+02	0.174E+04	0.366E+02
011	0.000	0.780E-02	0.352E-01	0.218E+03	0.142E+03	-0.750E+01	0.174E+04	0.366E+02
011	-0.100	0.778E-02	0.345E-01	0.219E+03	0.141E+03	-0.750E+01	0.174E+04	0.364E+02
012	-0.100	0.778E-02	0.345E-01	0.219E+03	0.141E+03	-0.750E+01	0.174E+04	0.364E+02
012	-0.200	0.776E-02	0.338E-01	0.220E+03	0.140E+03	-0.750E+01	0.175E+04	0.361E+02
013	-0.200	0.776E-02	0.338E-01	0.220E+03	0.140E+03	-0.750E+01	0.175E+04	0.361E+02
013	-0.300	0.775E-02	0.331E-01	0.221E+03	0.139E+03	-0.750E+01	0.176E+04	0.359E+02
014	-0.300	0.775E-02	0.331E-01	0.221E+03	0.139E+03	-0.750E+01	0.176E+04	0.359E+02
014	-0.400	0.773E-02	0.324E-01	0.222E+03	0.138E+03	-0.750E+01	0.177E+04	0.356E+02
015	-0.400	0.773E-02	0.324E-01	0.222E+03	0.138E+03	-0.750E+01	0.177E+04	0.356E+02
015	-0.500	0.771E-02	0.316E-01	0.223E+03	0.137E+03	-0.750E+01	0.177E+04	0.354E+02
016	-0.500	0.771E-02	0.316E-01	0.223E+03	0.137E+03	-0.750E+01	0.177E+04	0.354E+02
016	-0.600	0.769E-02	0.309E-01	0.224E+03	0.136E+03	-0.750E+01	0.178E+04	0.352E+02
017	-0.600	0.769E-02	0.309E-01	0.224E+03	0.136E+03	-0.750E+01	0.178E+04	0.352E+02
017	-0.700	0.767E-02	0.302E-01	0.225E+03	0.135E+03	-0.750E+01	0.179E+04	0.349E+02
018	-0.700	0.767E-02	0.302E-01	0.225E+03	0.135E+03	-0.750E+01	0.179E+04	0.349E+02
018	-0.800	0.766E-02	0.295E-01	0.226E+03	0.134E+03	-0.750E+01	0.180E+04	0.347E+02

072	-6.100	0.660E-02	0.184E-03	0.237E+03	0.123E+03	0.800E+02	0.189E+04	0.317E+02
072	-6.200	0.658E-02	0.143E-03	0.227E+03	0.133E+03	0.800E+02	0.181E+04	0.343E+02
073	-6.200	0.658E-02	0.143E-03	0.227E+03	0.133E+03	0.800E+02	0.181E+04	0.343E+02
073	-6.300	0.656E-02	0.987E-04	0.217E+03	0.143E+03	0.800E+02	0.173E+04	0.369E+02
074	-6.300	0.656E-02	0.987E-04	0.217E+03	0.143E+03	0.800E+02	0.173E+04	0.369E+02
074	-6.400	0.655E-02	0.510E-04	0.207E+03	0.153E+03	0.800E+02	0.165E+04	0.395E+02
075	-6.400	0.655E-02	0.510E-04	0.207E+03	0.153E+03	0.800E+02	0.165E+04	0.395E+02
075	-6.500	0.653E-02	0.163E-07	0.197E+03	0.163E+03	0.800E+02	0.157E+04	0.421E+02

	tassement pieu	tassement sol	effort pieu	effort sol	frottement latéral	dsigma pieu	dsigma sol
max+	0.356E-01	0.356E-01	0.271E+03	0.163E+03	0.800E+02	0.216E+04	0.421E+02
max-	0.653E-02	0.163E-07	0.197E+03	0.886E+02	-0.264E+02	0.157E+04	0.229E+02

		y tete (L)	Q tete (F)	%	Sigma tete (FL-2)	raideur surf. (FL-3)
Sans renforcement		0.1094				
Avec renforcement	Pieu	0.0356	201.000	0.628	1599.507	44977.8
	Sol (moyenne)	0.0356	119.000	0.372	30.715	863.2
	Maille		320.000	1.000	80.000	

Sollicitations dans l'inclusion

- contrainte maximale S_max = 2159.7
- atteinte à cote Z = -4.700
- charge maximale Qmax = 271.4
- sécurité par rapport à Qc(Z) = 409.9 F= 1.51
- sécurité par rapport à Ql(Z) = 585.6 F= 2.16

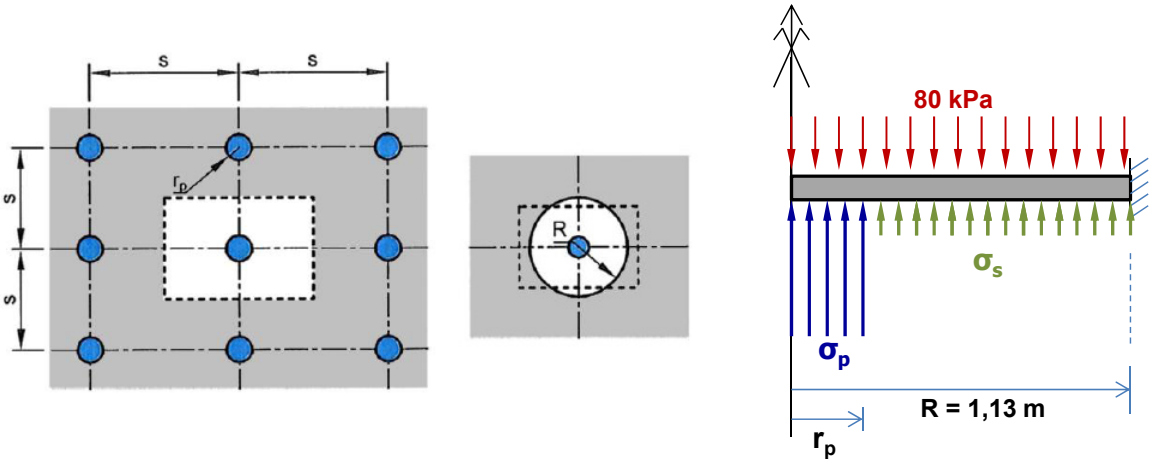
F.4.3.9 Vérifications complémentaires - Evaluation des "sollicitations additionnelles" dans le dallage

Les résultats du modèle Taspie+ peuvent être utilisés pour évaluer les sollicitations additionnelles dans le dallage dues à la présence des inclusions. Celles-ci sont à combiner avec celles issues d'un calcul de dallage sur sol homogénéisé équivalent.

Ces sollicitations additionnelles peuvent être calculées soit de manière analytique, soit à l'aide du module TASPLAQ, en mode axisymétrique par exemple.

F.4.3.9.1 Principe du calcul Tasplaq

On s'intéresse au comportement du dallage en partie courante dans une maille élémentaire. Celui-ci est assimilé à une plaque circulaire équivalente encastrée au bord (par symétrie) et soumise à l'application d'une surcharge q_0 = 80 kPa sur sa face supérieure, et aux réactions du massif renforcé (σ_p, σ_s) sur sa face inférieure comme le schématise la figure suivante.



Le rayon équivalent de la plaque représentative du dallage dans une maille élémentaire est directement lié au pas du maillage dans chaque direction "a" :

$$R = a / \pi^{1/2} = 1{,}13 \text{ m}$$

Les réactions du massif renforcé en sous-face du dallage se décomposent en deux parties :

- réaction à l'aplomb des inclusions σ_p, supposée se développer sur un rayon "r_p", calculé en considérant une diffusion des contraintes à 1h/5v dans le corps du matelas depuis la tête de l'inclusion jusqu'à la sous-face du dallage. Pour des inclusions de 40 cm de diamètre et un matelas de 50 cm d'épaisseur, on a r_p = 30 cm ;
- réaction entre les inclusions σ_s prise égale à la contrainte appliquée sur le sol issue du modèle Taspie+, soit σ_s = 30,72 kPa (cf les résultats formatés).

L'équation de conservation de la charge permet d'aboutir à la valeur de σ_p :

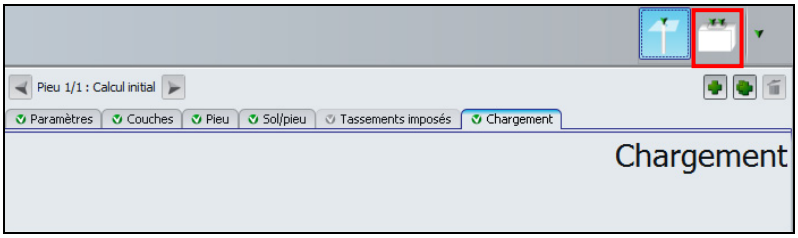
$$\sigma_p \times r_p^2 + \sigma_s \times (R^2 - r_p^2) = q_0 \times R^2$$

Application numérique : σ_p = 730 kPa.

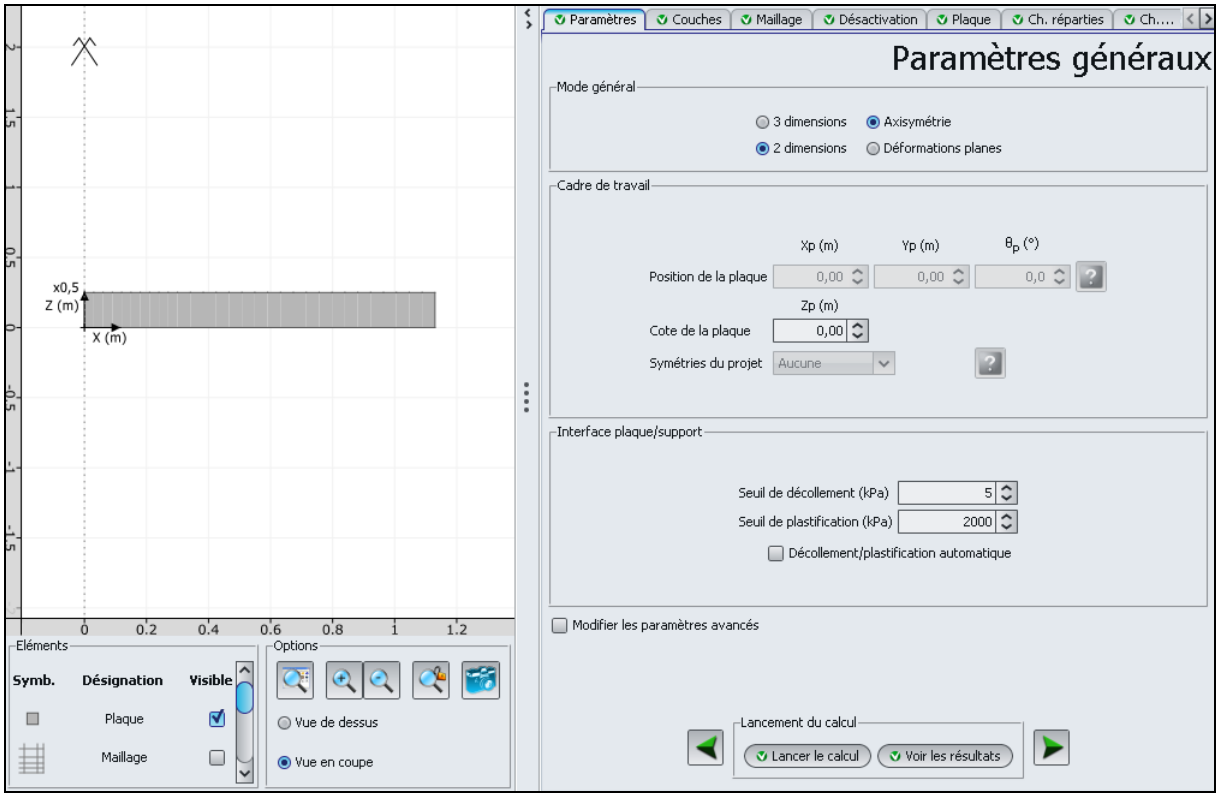
Sur la base de ces éléments, on propose à présent d'utiliser TASPLAQ pour le calcul desdites sollicitations "additionnelles" dans le dallage.

Lancer le module TASPLAQ en cliquant sur le bouton

situé en haut à droite de l'écran, et saisir les données conformément aux sous-chapitres suivants (voir aussi la partie I du manuel pour plus des informations plus complètes sur le module Tasplaq).



F.4.3.9.2 Onglet "Paramètres"



Cadre "Mode général" :

- Choisir le mode "2 dimensions / Axisymétrie".

Cadre "cadre de travail" :

- Cote de la plaque Z_p : 0,0 m (s'agissant d'une dalle sur appuis, sans définition de couches de sol, on peut la définir à une cote quelconque. On conserve donc la cote proposée par défaut).

Cadre Interface plaque/support (on conserve les valeurs et choix par défaut) :

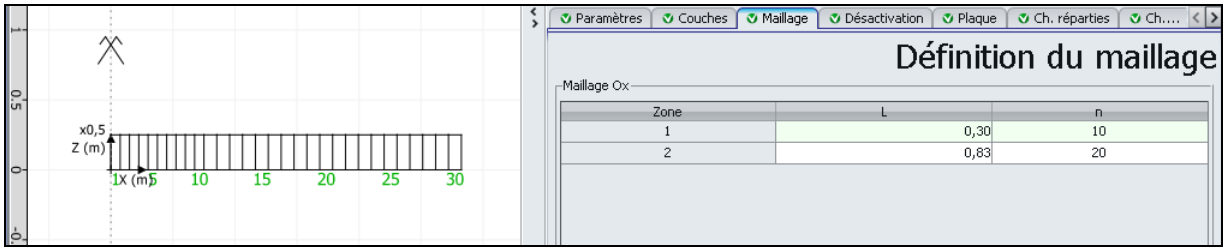
- seuil de décollement : 5 kPa ;
- seuil de plastification : 2000 kPa ;
- laisser décochée la case "Décollement de plastification automatique" ;
- laisser décochée la case "Modifier les paramètre avancés".

F.4.3.9.3 Onglet "Couches"

Le dallage est considéré comme une plaque circulaire sur appuis, soumise à la surcharge de 80 kPa d'une part, et aux réactions du massif renforcé d'autre part. Ces réactions sont modélisées comme des surcharges. On ne définit donc pas ici les couches de sol.

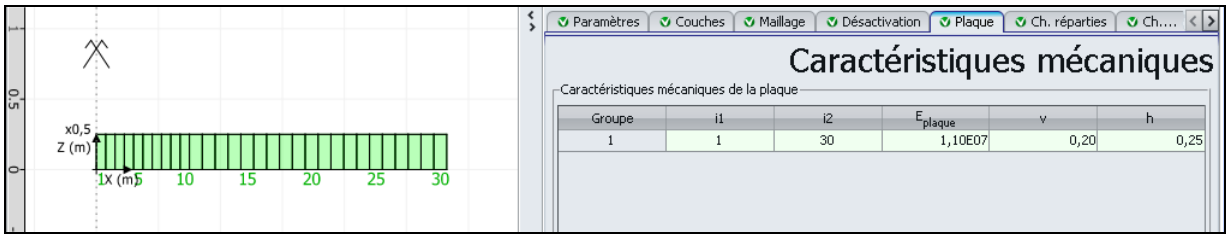
F.4.3.9.4 Onglet "Maillage"

- zone 1 : L = 0,30 m et n = 10 ;
- zone 2 : L = 1,13 – 0,3 = 0,83 m et n = 20.



F.4.3.9.5 Onglet "Plaque"

Définir une zone unique couvrant la totalité de la plaque.



Les données à saisir sont les suivantes :

- le numéro selon Ox de l'élément le plus à gauche de la zone i1 ;
- le numéro selon Ox de l'élément le plus à droite de la zone i2 ;
- le module d'Young de la plaque E_{plaque} (kPa) ;
- le coefficient de poisson de la plaque ν ;
- l'épaisseur de la plaque h (m).

Groupe	i1	i2	E_{plaque} (kPa)	ν	h (m)
1	1	30	1,10E07	0,20	0,25

F.4.3.9.6 Onglet "Charges réparties"

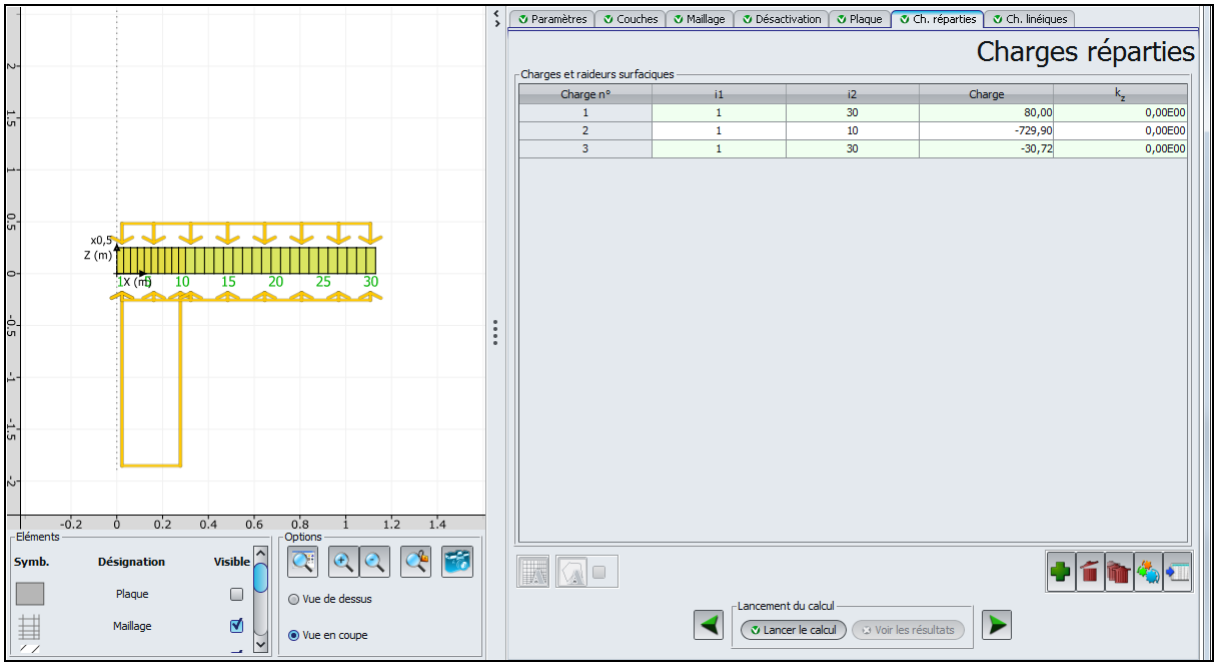
Trois charges distinctes sont à définir. Elles correspondent :

- à la charge de 80 kPa sur l'ensemble de la plaque ;
- à la réaction de 729,90 kPa en sous-face de dallage à l'aplomb des inclusions ;
- à la réaction de 30,72 kPa en sous-face de dallage entre les inclusions.

Les données à saisir sont les suivantes :

Charge n°	i1	i2	Charge (kPa)	k_z (kPa/m)
1	1	30	80,00	0,00
2	1	10	-729,90	0,00
3	11	30	-30,72	0,00

Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011**



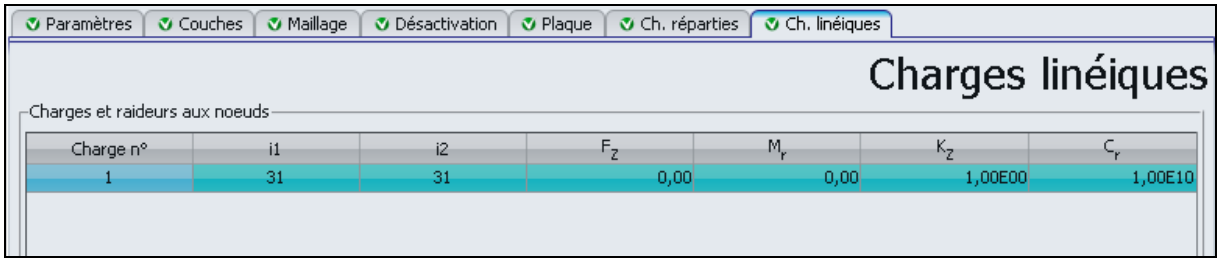
F.4.3.9.7 Onglet "Charges linéiques"

Du fait qu'on ne représente qu'une maille en axisymétrie, il convient de bloquer la rotation de la plaque au bord de la maile :

- On définit donc, au nœud 31, Cr = 1,00E^{10} kNm/rad/ml

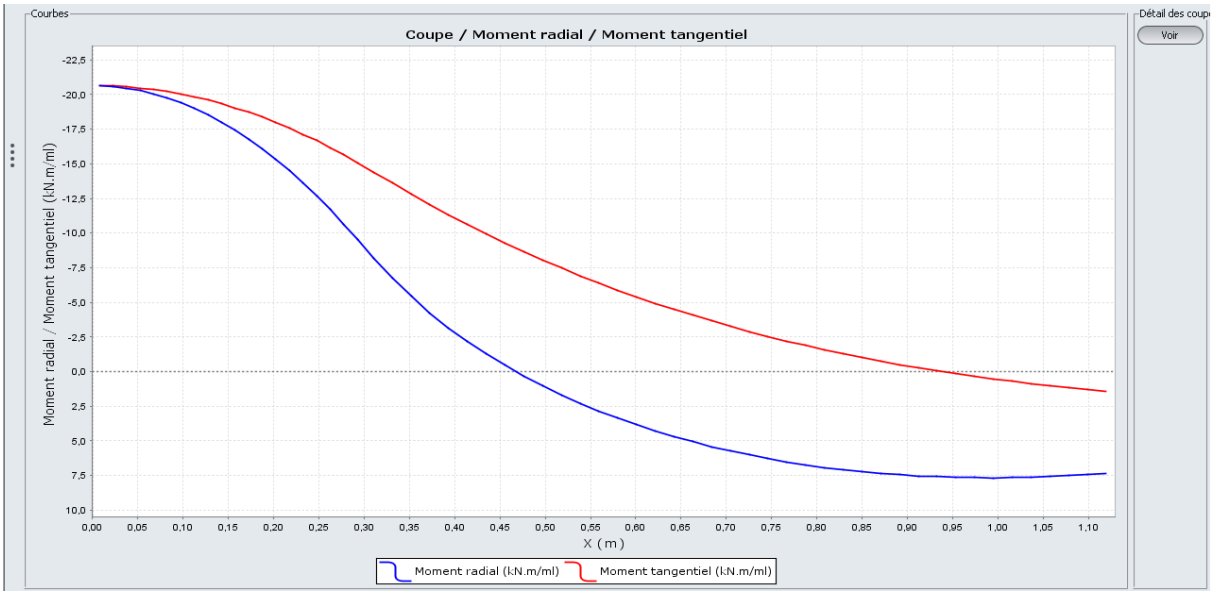
D'autre part, afin de ne pas avoir un système hypostatique, il est nécessaire de renseigner une valeur non nulle de K_z (raideur linéique en translation) au bord de la plaque par exemple ou en n'importe quel nœud du maillage. Sachant que le choix de cette valeur n'a aucune incidence sur l'équilibre de la plaque puisque la résultante des efforts extérieurs appliqués est nulle :

- On propose de prendre K_z = 1,0 kN/m/ml.



F.4.3.9.8 Calculs et Résultats

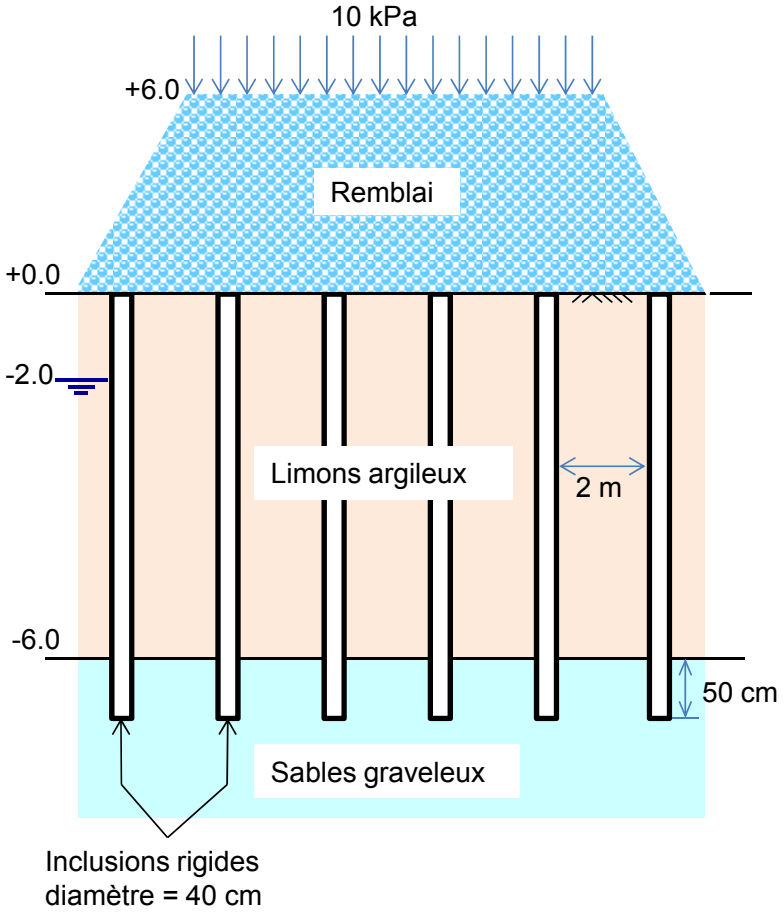
Les moments fléchissants sont compris dans une enveloppe [M_{inf}, M_{sup}] avec M_{inf} = -20,7 kNm/ml obtenu à l'aplomb des inclusions et M_{sup} = +7,7 kN.m/ml obtenu au bord. Il s'agit des moments additionnels à combiner avec un calcul de dallage sur sol homogénéisé. Le signe négatif du moment obtenu à l'aplomb des inclusions signifie que la fibre supérieure est en traction (effet "point dur").



F.4.4. Exemple 4 : Remblai sur sol renforcé par inclusions rigides

Le projet étudié est illustré dans la figure ci-dessous.

Il s'agit d'un remblai autoroutier de 6 m de hauteur supportant une surcharge d'exploitation de 10 kPa en surface. Les conditions des terrains en place ont justifié la mise en œuvre d'un renforcement par inclusions rigides afin de réduire les tassements et justifier la stabilité au poinçonnement.



Les caractéristiques des terrains en place et des inclusions sont identiques à celles du projet précédent (exemple 3 : dallage sur inclusions). Elles sont rappelées dans le tableau ci-dessous :

Couche	Z_{toit} (m)	γ (kN/m^3)	E_M (MPa)	P_l* (MPa)	q_{sl} (kPa) (**)	E (MPa)(*)
Remblai	+6,00	20	15	--	--	50
Limons argileux	+0,00	19	2,5	0,3	20	5
Sables graveleux	-6,00	20	20	2,0	80	80

(*) E désigne le module élastique de déformation verticale.
(**) q_{sl} désigne le frottement limite unitaire sol/inclusion.

Nota : Les couches de sols étant similaires à celles de l'exemple précédent, l'utilisation de la base de données des sols aurait pu s'avérer utile. Elle aurait permis de partager les sols et ses caractéristiques entre les deux projets et donc d'éviter de les ressaisir.

Il est toujours temps de passer par la base de données : si vous le souhaitez, ouvrir l'exemple 3 avant de commencer l'exemple 4, et exporter les couches de sol de l'exemple 3 vers la base de données générales, puis activer au début de l'exemple 4 ci-dessous l'utilisation de la base de données (sur l'écran de choix des modules), et importer les sols de la base de données générale dans le projet en cours. Voir le chapitre C pour les explications détaillées concernant l'utilisation de la base de données des sols.

F.4.4.1 Saisie des données

Double cliquer sur l'icône Foxta pour lancer le programme, choisir le type de connexion et la langue souhaités puis cliquer sur le bouton OK.

A l'ouverture de l'application, Foxta propose :

- de créer un nouveau projet ;
- d'ouvrir un projet existant ;
- d'ouvrir automatiquement le dernier projet utilisé.

Dans le cas de cet exemple :

- choisir de créer un nouveau projet en sélectionnant le radio-bouton Nouveau projet ;
- cliquer sur le bouton OK.

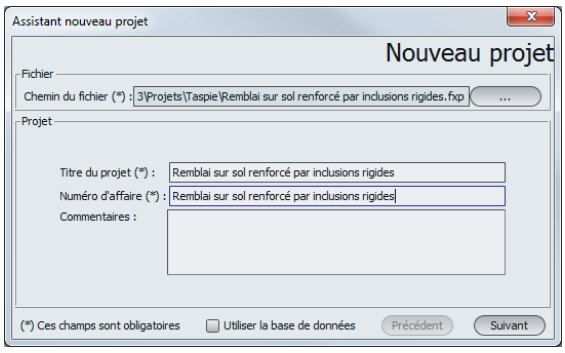
F.4.4.1.1 Assistant Nouveau projet

Cadre "Fichier" :

- renseigner le chemin du projet en cliquant sur le bouton ... ;
- donner un nom au projet et l'enregistrer.

Cadre "Projet" :

- donner un titre au projet ;
- saisir un numéro d'affaire ;
- compléter avec un commentaire si besoin ;
- laisser la case "Utiliser la base de données" décochée (nous n'utiliserons pas la base de données pour cet exemple), et cliquer sur le bouton Suivant.



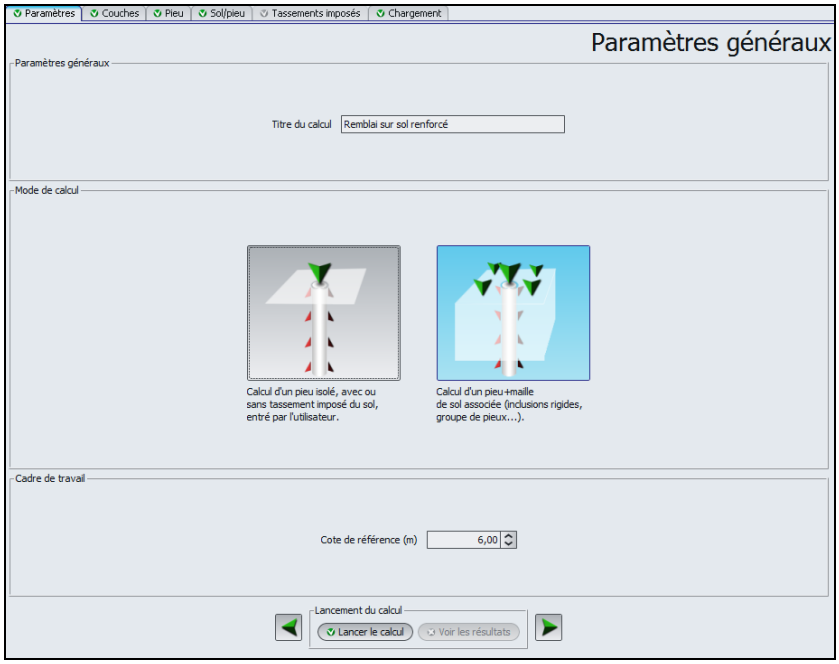
F.4.4.1.2 Assistant nouveau projet : Choix des modules

Sélectionner les modules Taspie+ et Tasplaq, puis cliquer sur le bouton Créer.

La fenêtre de saisie des données Taspie+ apparaît alors. Il convient de compléter les différents onglets par les données nécessaires au calcul.

F.4.4.1.3 Onglet "Paramètres"

Cet onglet concerne les paramètres généraux du calcul.



<u>Cadre Paramètres généraux"</u> :

- Indiquer le titre du Calcul : "Remblai sur sol renforcé".

<u>Cadre "Mode de calcul"</u> :

- Sélectionner "Calcul d'un pieu + maille de sol associée".

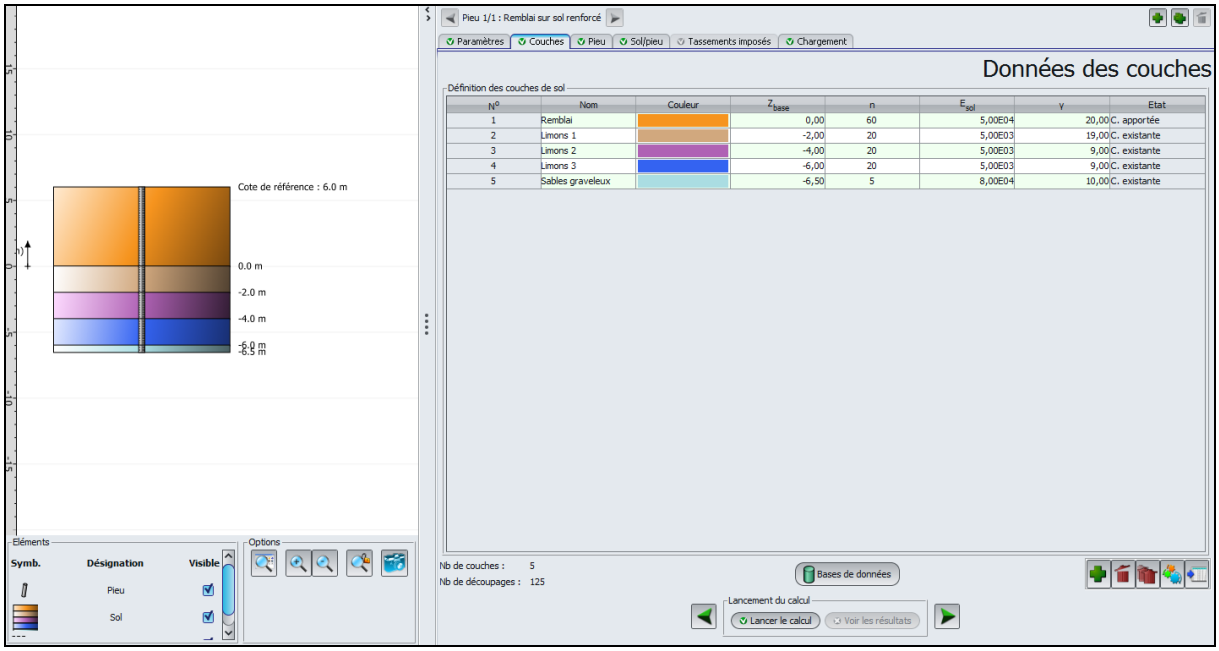
<u>Cadre "Cadre de travail"</u>

- Changer la cote de référence : +6,0 m, correspondant au toit du remblai.

Pour passer à l'onglet suivant, cliquer soit sur le nom de l'onglet "Couches", soit sur le bouton .

F.4.4.1.4 Onglet "Couches"

Cet onglet concerne la définition des couches de sol. Comme dans l'exercice 3, la couche de limons a été subdivisée en trois sous couches de 2 m d'épaisseur chacune afin d'affiner le choix de certains paramètres. Le modèle s'arrête à la base des inclusions.



Utiliser le bouton pour créer chacune des couches.

Les paramètres à saisir sont récapitulés dans le tableau suivant :

Nom	Z_{base}	n	E_{sol}	γ '	Etat
Remblai	0.00	60	5.00E+04	20	Apportée
Limons 1	-2.00	20	5.00E+03	19	Existante
Limons 2	-4.00	20	5.00E+03	9	Existante
Limons 3	-6.00	20	5.00E+03	9	Existante
Sables	-6.50	5	8.00E+04	10	Existante

F.4.4.1.5 Onglet "Pieu"

Cet onglet concerne les caractéristiques du "domaine inclusion". Celui-ci est constitué par l'inclusion elle-même ainsi que le volume de sol qui la prolonge jusqu'à la tête du modèle.

Cadre "Type de pieu"

- mode de mise en œuvre de pieu : Avec refoulement ;
- type de section du pieu : Section circulaire.

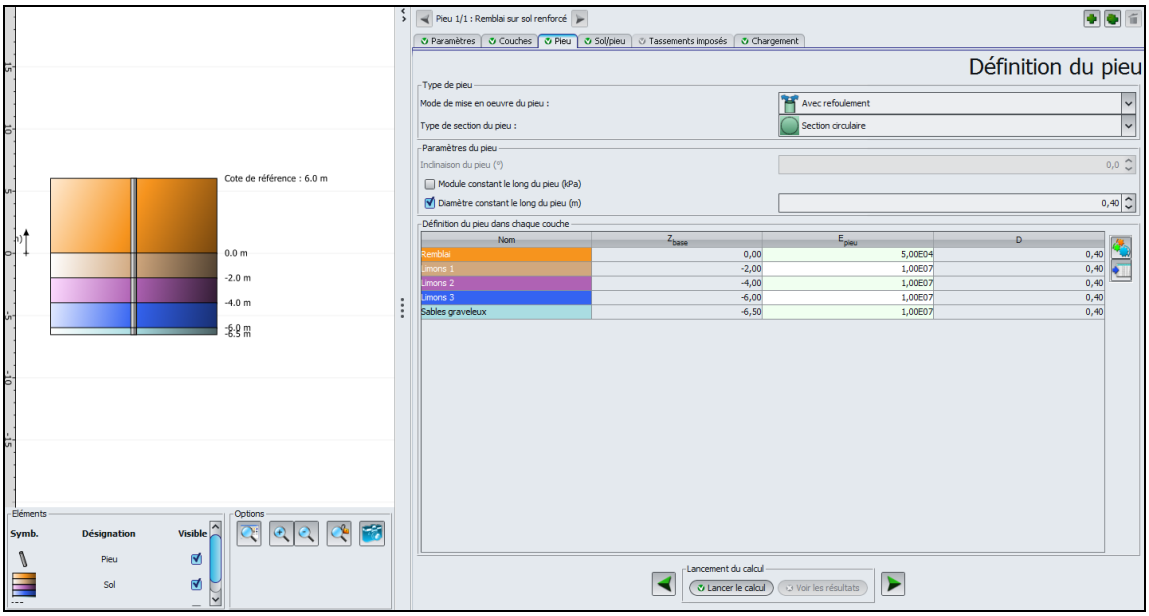
Cadre "Paramètres du pieu"

- inclinaison du pieu : 0° ;
- module constant le long du pieu : décoché ;
- diamètre constant le long du pieu : coché, D = 0,40 m.

Cadre "Définition du pieu dans chaque couche"

On complète par les valeurs des modules de déformation du "domaine pieu" dans chaque couche. Ceux-ci correspondent :

- au module du remblai (50 MPa) dans la première couche ;
- au module du béton constitutif de l'inclusion jusqu'à la base du modèle (10 000 MPa).



Astuce : il est possible de cocher d'abord la case "Module constant le long du pieu", d'entrer une valeur de 10 000 MPa, puis de décocher ladite case et de ne modifier que la valeur de la première couche en 50 MPa.

Les données à saisir sont les suivantes :

Nom	**Z_{base}** (m)	**E_{pieu} (kPa)**	**D** (m)
Remblai	0.00	5,00E04	0,40
Limons 1	-2.00	1,00E07	0,40
Limons 2	-4.00	1,00E07	0,40
Limons 3	-6.00	1,00E07	0,40
Sables	-6.50	1,00E07	0,40

F.4.4.1.6 Onglet "Sol/Pieu"

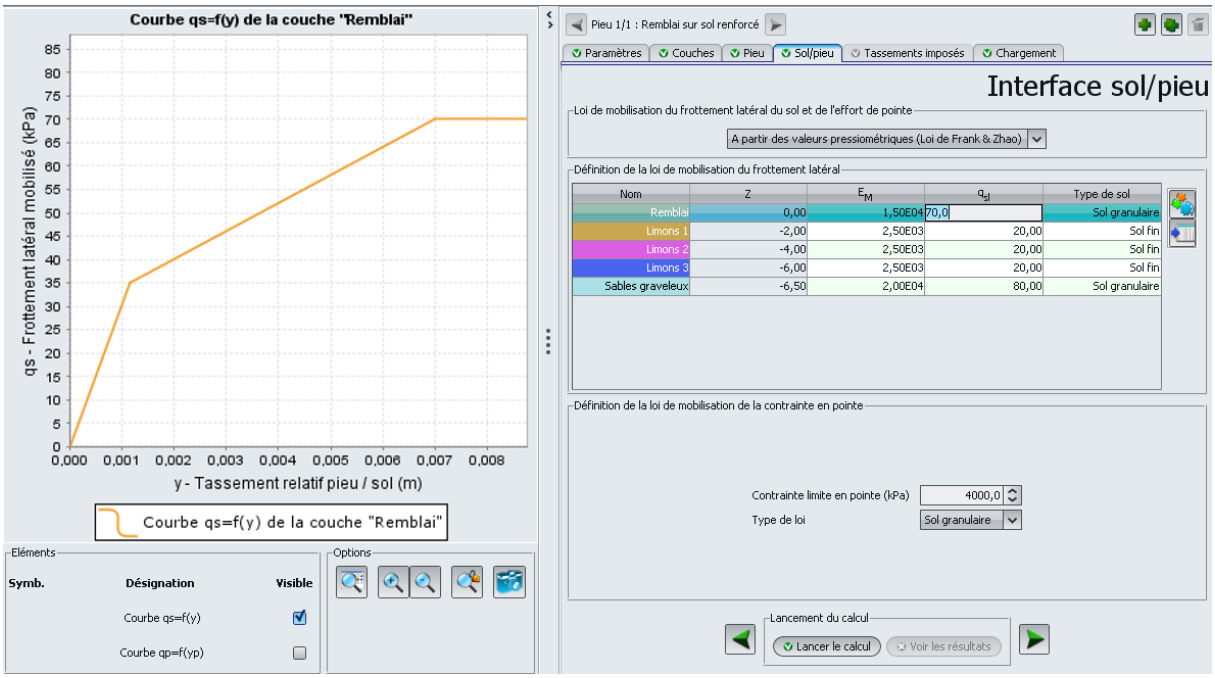
Cet onglet permet de définir les lois de mobilisation de frottement et l'effort en pointe.

Comme dans l'exercice 3, la loi de mobilisation du frottement latéral est celle de Frank et Zhao construite à partir des valeurs pressiométriques. Le frottement dans les trois sous-couches de limons est à 20 kPa (en première itération). La loi de frottement dans la couche représentative du remblai s'apparente à une condition de contact de type "sol/sol" pour laquelle le cisaillement est limité à la contrainte verticale effective entre les inclusions (ktanδ = 1).

On choisit cette fois en première approche une valeur du frottement limite dans le remblai de 70 kPa correspondant au poids des terres évalué à mi-hauteur de la couche (60 kPa) + la surcharge appliquée en tête (10 kPa).

La loi de mobilisation de la contrainte en pointe est celle de Frank et Zhao pour sol granulaire, avec une contrainte limite prise égale à q_{pl} = kp x pl* = 2,0 x 2000 = 4000 kPa.

Notons à nouveau que ces lois proposées ne sont rigoureusement valables que pour un pieu foré. Leur application sur une inclusion mise en œuvre avec refoulement dans des sables et/ou graves constitue une approche pessimiste.


Courbe qs=f(y) de la couche "Remblai"
qs - Frottement latéral mobilisé (kPa)
y - Tassement relatif pieu / sol (m)
Courbe qs=f(y) de la couche "Remblai"
Eléments
Symb.
Désignation
Visible
Courbe qs=f(y)
Courbe qp=f(yp)
Options
Pieu 1/1 : Remblai sur sol renforcé
Paramètres
Couches
Pieu
Sol/pieu
Tassements imposés
Chargement
Interface sol/pieu
Loi de mobilisation du frottement latéral du sol et de l'effort de pointe
A partir des valeurs pressiométriques (Loi de Frank & Zhao)
Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral
Nom
z
E_M
q_sl
Type de sol
Remblai 0,00 1,50E04 70,0 Sol granulaire
Limons 1 -2,00 2,50E03 20,00 Sol fin
Limons 2 -4,00 2,50E03 20,00 Sol fin
Limons 3 -6,00 2,50E03 20,00 Sol fin
Sables graveleux -6,50 2,00E04 80,00 Sol granulaire
Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe
Contrainte limite en pointe (kPa) 4000,0
Type de loi Sol granulaire
Lancement du calcul
Lancer le calcul
Voir les résultats

Cadre "Loi de mobilisation de frottement latéral du sol et de l'effort de pointe" :

- Choisir dans la liste déroulante : "A partir des valeurs pressiométriques (Loi de Frank & Zhao)". Il s'agit de la sélection par défaut.

Cadre "Définition de la loi de mobilisation du frottement latéral" :

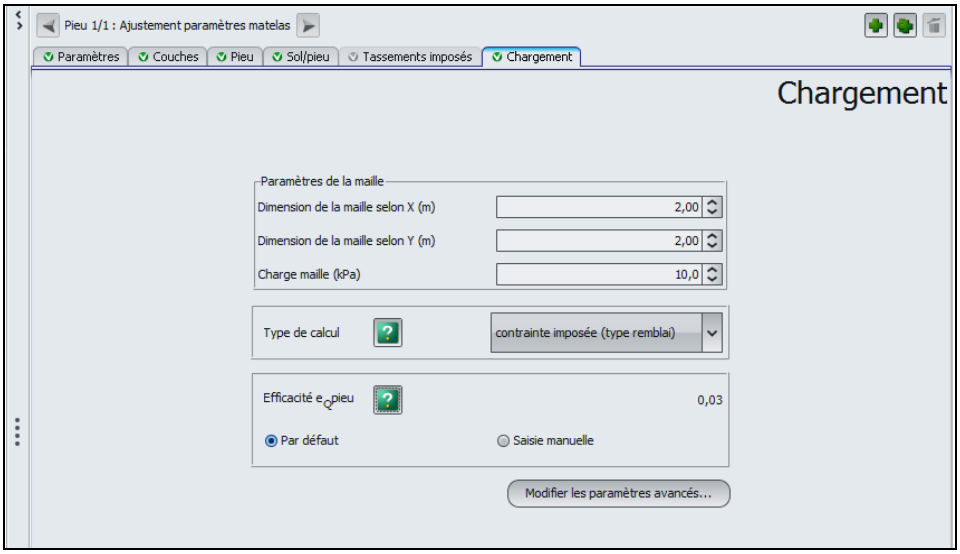
Nom	**E_M** (kPa)	**q_{sl}** (kPa)	**Type de sol**
Remblai	1,50E+04	70,0	Sol granulaire
Limons 1	2,50E+03	20,0	Sol fin
Limons 2	2,50E+03	20,0	Sol fin
Limons 3	2,50E+03	20,0	Sol fin
Sables	2,00E+04	80,0	Sol granulaire

Cadre "Définition de la loi de mobilisation de la contrainte en pointe" :

- contrainte limite en pointe : 4000 kPa ;
- type de loi : Sol granulaire.

F.4.4.1.7 Onglet "Chargement"

Cet onglet permet de définir le maillage des inclusions ainsi que les conditions de chargement en tête du modèle.



Cadre "Paramètres de la maille" :

- dimension de la maille selon X : 2,0 m ;
- dimension de la maille selon Y : 2,0 m ;
- charge maille : 10 kPa.
  Il s'agit de la contrainte moyenne appliquée en tête du modèle (surcharge routière)

Cadre "Type de calcul" :

- type de calcul : contrainte imposée (type remblai).

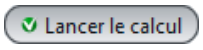
Cadre "Efficacité $e_Q$pieu" :

- efficacité $e_Q$pieu : valeur par défaut (0,03).

Il s'agit du rapport entre l'effort appliqué en tête du domaine pieu et l'effort total appliqué en tête de la maille. La valeur par défaut proposée correspond au prorata des surfaces inclusion/maille, ce qui équivaut à une contrainte uniforme en tête du modèle.

F.4.4.2 Calcul et Résultats

F.4.4.2.1 Calcul

Une fois que toutes les données sont correctement saisies, le bouton 

est alors actif. Un clic sur ce bouton lancera le calcul.

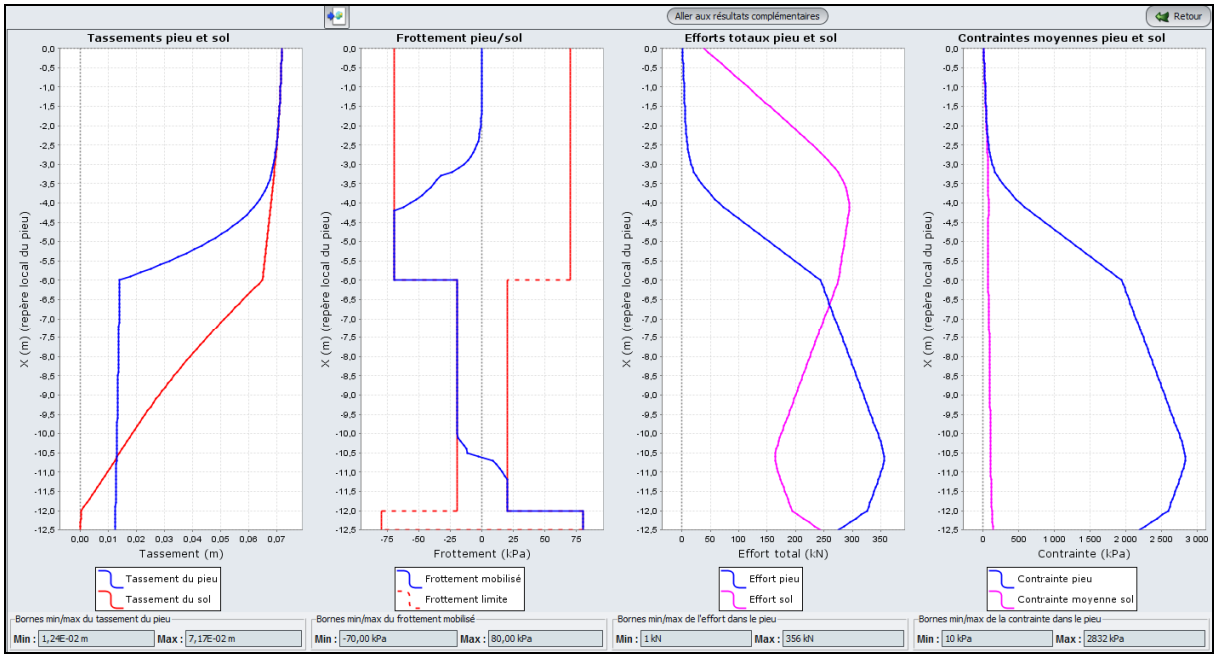
F.4.4.2.2 Résultats

Cliquer sur le bouton

pour accéder aux résultats.

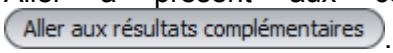
"Résultats graphiques"

Cliquer sur le bouton "Résultats principaux". Cela permet d'accéder aux courbes de tassements, frottements, efforts et contraintes en profondeur.

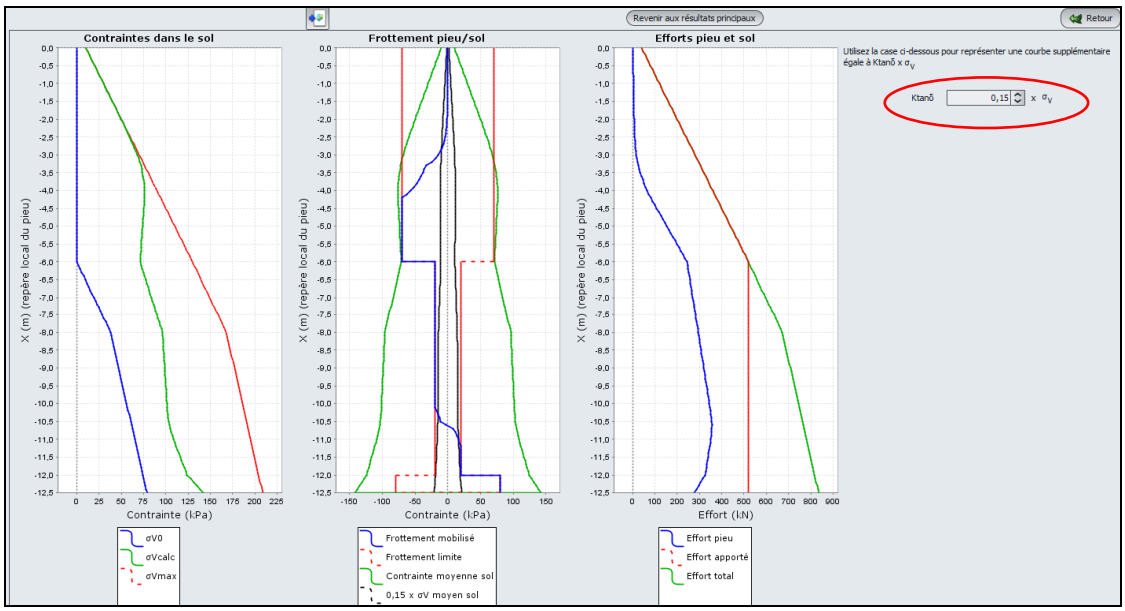


Le tassement maximal obtenu est de l'ordre de 7 cm, dont 5,5 cm sont produits dans le corps du remblai (à l'aplomb de l'inclusion). On observe là aussi la formation de deux plans d'égal tassement :

- le premier est obtenu dans le corps du remblai et est synonyme de la formation d'un effet de voûte : au dessus de ce plan neutre, le corps du remblai tasse uniformément et aucun cisaillement vertical n'y est développé ;
- le second est obtenu en profondeur (vers la cote -4.5 m, soit à la profondeur -10,5 m dans le repère local du pieu) et marque la base de la zone de frottement négatif.

Aller à présent aux courbes complémentaires en cliquant sur le bouton 

.



*Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011***

Ces résultats montrent que le cisaillement vertical mobilisé dans le corps du remblai est compatible avec le niveau de contrainte verticale dans le remblai. En revanche, l'affichage d'une courbe 0,15 x $\sigma_{v'}$ suggère un ajustement des limites de frottement dans les quatre premiers mètres des limons où ce frottement est négatif.

Une reprise du calcul en plafonnant le frottement dans les limons 1 et 2 respectivement à 13 et 15 kPa permet d'aboutir un profil de frottement négatif compatible en tout point avec l'état de contrainte verticale, sans influer le comportement global du système de renforcement.

F.4.4.3 Vérifications complémentaires

F.4.4.3.1 Portance des inclusions

Taspie+ évalue à la fin de chaque calcul la sécurité F disponible entre l'effort maximal dans l'inclusion et la charge critique de fluage calculée sous le plan de neutre. Ici, on a F = 1,19.

		y tete (L)	Q tete (F)	%	Sigma tete (FL-2)	raideur surf. (FL-3)
Sans renforcement		0.1652				
Avec renforcement	Pieu	0.0743	1.257	0.031	10.000	134.6
	Sol (moyenne)	0.0743	38.743	0.969	10.000	134.6
	Maille		40.000	1.000	10.000	

Sollicitations dans l'inclusion

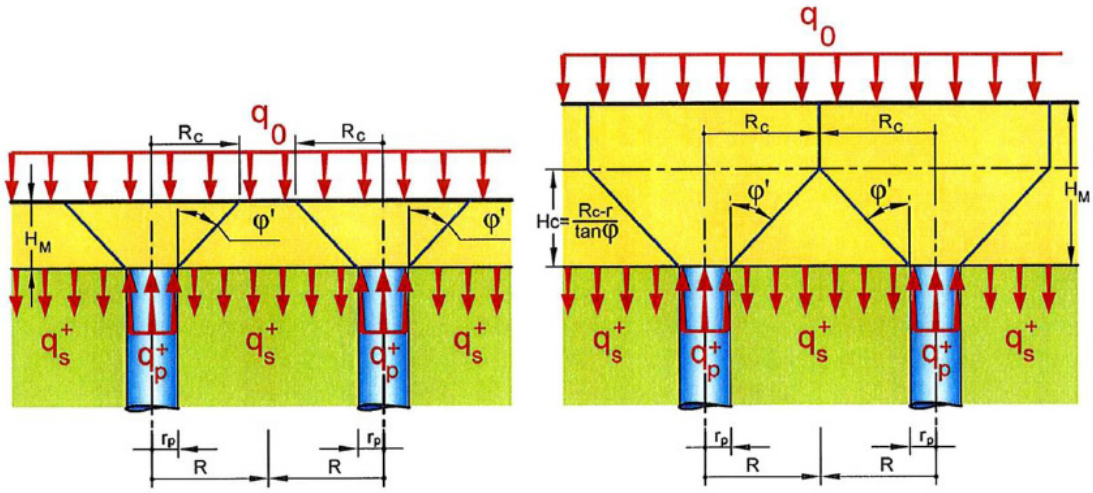
- contrainte maximale	S_max =	2719.0		
- atteinte à cote	Z =	-4.900		
- charge maximale	Qmax =	341.7		
- sécurité par rapport à Qc(Z) =		406.4	F=	1.19
- sécurité par rapport à Ql(Z) =		580.6	F=	1.70

Pour le projet étudié ici, les inclusions servent à la fois à réduire les tassements et à assurer la stabilité de l'ouvrage. La vérification de la portance des inclusions est donc nécessaire. Le facteur de sécurité obtenu (1,19 > 1,10) est jugé ici acceptable pour justifier de la portance de l'ouvrage en combinaisons ELS caractéristiques.

Pour vérifier la portance en combinaisons ELS quasi-permanentes, un calcul sans surcharge routière peut être conduit en visant cette fois-ci une sécurité d'au moins 1,40.

F.4.4.4 Poinçonnement du remblai

Le cas d'un remblai se traite d'une manière analogue à celui du matelas (exemple 3). Il nécessite néanmoins d'examiner en plus du schéma de Prandtl décrit précédemment, un schéma de rupture de type "cône de diffusion" comme le montre la figure suivante. Il convient ensuite de retenir le mécanisme conduisant à la plus faible contrainte limite en tête de l'inclusion.



La mise en œuvre de ces deux schémas (non développée ici) conduit à une contrainte limite en tête de l'inclusion de 2540 kPa en considérant un angle de frottement interne de 38° pour le remblai (c'est le schéma de Prandtl qui donne ici la valeur enveloppe de 2540 kPa. Le schéma « cône de diffusion » conduit ici à une contrainte limite de 3690 kPa). Cette valeur est à comparer à celle de la contrainte effectivement appliquée en tête de l'inclusion issue du modèle Taspie+ : 2020 .kPa. Il n'y a donc pas de poinçonnement dans le corps du remblai.

043	1.700	0.605E-01	0.700E-01	0.100E+03	0.284E+03	-0.700E+02	0.797E+03	0.733E+02
044	1.700	0.605E-01	0.700E-01	0.100E+03	0.284E+03	-0.700E+02	0.797E+03	0.733E+02
044	1.600	0.588E-01	0.699E-01	0.109E+03	0.283E+03	-0.700E+02	0.869E+03	0.730E+02
045	1.600	0.588E-01	0.699E-01	0.109E+03	0.283E+03	-0.700E+02	0.869E+03	0.730E+02
045	1.500	0.570E-01	0.698E-01	0.118E+03	0.282E+03	-0.700E+02	0.941E+03	0.727E+02
046	1.500	0.570E-01	0.698E-01	0.118E+03	0.282E+03	-0.700E+02	0.941E+03	0.727E+02
046	1.400	0.550E-01	0.696E-01	0.127E+03	0.281E+03	-0.700E+02	0.101E+04	0.724E+02
047	1.400	0.550E-01	0.696E-01	0.127E+03	0.281E+03	-0.700E+02	0.101E+04	0.724E+02
047	1.300	0.529E-01	0.695E-01	0.136E+03	0.280E+03	-0.700E+02	0.109E+04	0.722E+02
048	1.300	0.529E-01	0.695E-01	0.136E+03	0.280E+03	-0.700E+02	0.109E+04	0.722E+02
048	1.200	0.507E-01	0.693E-01	0.145E+03	0.279E+03	-0.700E+02	0.116E+04	0.719E+02
049	1.200	0.507E-01	0.693E-01	0.145E+03	0.279E+03	-0.700E+02	0.116E+04	0.719E+02
049	1.100	0.483E-01	0.692E-01	0.154E+03	0.278E+03	-0.700E+02	0.123E+04	0.716E+02
050	1.100	0.483E-01	0.692E-01	0.154E+03	0.278E+03	-0.700E+02	0.123E+04	0.716E+02
050	1.000	0.458E-01	0.690E-01	0.164E+03	0.276E+03	-0.700E+02	0.130E+04	0.714E+02
051	1.000	0.458E-01	0.690E-01	0.164E+03	0.276E+03	-0.700E+02	0.130E+04	0.714E+02
051	0.900	0.431E-01	0.689E-01	0.173E+03	0.275E+03	-0.700E+02	0.137E+04	0.711E+02
052	0.900	0.431E-01	0.689E-01	0.173E+03	0.275E+03	-0.700E+02	0.137E+04	0.711E+02
052	0.800	0.403E-01	0.687E-01	0.182E+03	0.274E+03	-0.700E+02	0.145E+04	0.708E+02
053	0.800	0.403E-01	0.687E-01	0.182E+03	0.274E+03	-0.700E+02	0.145E+04	0.708E+02
053	0.700	0.373E-01	0.686E-01	0.191E+03	0.273E+03	-0.700E+02	0.152E+04	0.706E+02
054	0.700	0.373E-01	0.686E-01	0.191E+03	0.273E+03	-0.700E+02	0.152E+04	0.706E+02
054	0.600	0.342E-01	0.685E-01	0.200E+03	0.272E+03	-0.700E+02	0.159E+04	0.703E+02
055	0.600	0.342E-01	0.685E-01	0.200E+03	0.272E+03	-0.700E+02	0.159E+04	0.703E+02
055	0.500	0.310E-01	0.683E-01	0.209E+03	0.271E+03	-0.700E+02	0.166E+04	0.700E+02
056	0.500	0.310E-01	0.683E-01	0.209E+03	0.271E+03	-0.700E+02	0.166E+04	0.700E+02
056	0.400	0.276E-01	0.682E-01	0.218E+03	0.270E+03	-0.700E+02	0.173E+04	0.697E+02
057	0.400	0.276E-01	0.682E-01	0.218E+03	0.270E+03	-0.700E+02	0.173E+04	0.697E+02
057	0.300	0.240E-01	0.680E-01	0.227E+03	0.269E+03	-0.700E+02	0.181E+04	0.695E+02
058	0.300	0.240E-01	0.680E-01	0.227E+03	0.269E+03	-0.700E+02	0.181E+04	0.695E+02
058	0.200	0.204E-01	0.679E-01	0.236E+03	0.268E+03	-0.700E+02	0.188E+04	0.692E+02
059	0.200	0.204E-01	0.679E-01	0.236E+03	0.268E+03	-0.700E+02	0.188E+04	0.692E+02
059	0.100	0.165E-01	0.678E-01	0.245E+03	0.267E+03	-0.700E+02	0.195E+04	0.689E+02
060	0.100	0.165E-01	0.678E-01	0.245E+03	0.267E+03	-0.700E+02	0.195E+04	0.689E+02
060	0.000	0.126E-01	0.676E-01	0.254E+03	0.266E+03	-0.700E+02	0.202E+04	0.687E+02
061	0.000	0.126E-01	0.676E-01	0.254E+03	0.266E+03	-0.130E+02	0.202E+04	0.687E+02
061	-0.100	0.125E-01	0.663E-01	0.256E+03	0.264E+03	-0.130E+02	0.203E+04	0.682E+02
062	-0.100	0.125E-01	0.663E-01	0.256E+03	0.264E+03	-0.130E+02	0.203E+04	0.682E+02
062	-0.200	0.125E-01	0.649E-01	0.257E+03	0.263E+03	-0.130E+02	0.205E+04	0.678E+02
063	-0.200	0.125E-01	0.649E-01	0.257E+03	0.263E+03	-0.130E+02	0.205E+04	0.678E+02
063	-0.300	0.125E-01	0.636E-01	0.259E+03	0.261E+03	-0.130E+02	0.206E+04	0.674E+02
064	-0.300	0.125E-01	0.636E-01	0.259E+03	0.261E+03	-0.130E+02	0.206E+04	0.674E+02
064	-0.400	0.125E-01	0.622E-01	0.261E+03	0.259E+03	-0.130E+02	0.207E+04	0.670E+02
065	-0.400	0.125E-01	0.622E-01	0.261E+03	0.259E+03	-0.130E+02	0.207E+04	0.670E+02
065	-0.500	0.125E-01	0.609E-01	0.262E+03	0.258E+03	-0.130E+02	0.209E+04	0.666E+02
066	-0.500	0.125E-01	0.609E-01	0.262E+03	0.258E+03	-0.130E+02	0.209E+04	0.666E+02
066	-0.600	0.124E-01	0.595E-01	0.264E+03	0.256E+03	-0.130E+02	0.210E+04	0.661E+02
067	-0.600	0.124E-01	0.595E-01	0.264E+03	0.256E+03	-0.130E+02	0.210E+04	0.661E+02

*Edition Avril 2013 - **Copyright © Foxta v3 - 2011***